



Fachbereich Wirtschaftswissenschaften
Major Wirtschaftspsychologie

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Science

Die Erprobung eines aufgabenanalytischen Verfahrens zur Beschreibung der motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse bei manuell gefahrenen Spurwechseln auf Autobahnen

Evaluation of a certain task analysis methodology to describe the motor, perceptual and cognitive processes in manually driven lane changes on motorways

in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.



Vorgelegt von:	Alina Andree
Anschrift:	Bankstr. 3, 40476 Düsseldorf
Matrikelnr.:	3019389
Telefon:	01573/0367577
E-Mail:	alinaandree@gmx.de
Erstprüfer:	Prof. Dr. Rainer Höger
Zweitprüfer:	Dipl.-Psych. David Käthner
Anschrift:	Siegfriedstr. 118, 38106 Braunschweig
Abgabetermin:	28.09.2015

Kurzfassung

Fahrerassistenzsysteme sind wichtige Instrumente, die den Autofahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen, um kritische Fahrsituationen zu vermeiden und somit die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen. Spurwechselmanöver auf Autobahnen stellen besonders kritische Situationen dar, weil menschliches Fehlverhalten aufgrund der dort herrschenden Geschwindigkeitsdifferenzen erhebliche Folgen nach sich ziehen kann. Um Fahrerassistenzsysteme weiterentwickeln zu können, bedarf es an Wissen über das menschliche Fahrverhalten und die Fahrerkognition. Mangels eines Standardverfahrens zur Untersuchung der bei Fahraufgaben auftretenden motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse wurde daher eine CPM-GOMS-Analyse durchgeführt und hinsichtlich ihrer inhaltlichen und methodischen Eignung geprüft. Zu diesem Zweck wurde das Fahrverhalten von drei Versuchspersonen bei drei verschiedenen Spurwechseltypen auf einer zweispurigen Autobahn aufgezeichnet. Anschließend wurden Operatoren für die motorischen und perzeptuellen Prozesse erarbeitet und für die Auswertung der Fahrdaten angewandt. Mittels einer deskriptiven Analyse konnten bestimmte Operatoreigenschaften und ihre Gemeinsamkeiten beziehungsweise Unterschiede bei verschiedenen Spurwechseltypen bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Anwendung der CPM-GOMS-Analyse zwar grundsätzlich für die Erörterung der motorischen und perzeptuellen Prozesse eignet, die Zerlegung mancher Operatoren und der Einsatz zusätzlicher Systeme und Methoden für die Aufzeichnung des Fahrverhaltens allerdings zu konsistenteren Ergebnissen führen könnte.

Stichwörter: CPM-GOMS, Spurwechselmanöver, Fahrverhalten

Abstract

Driving assistance systems are important instruments, which support the driver in avoiding critical driving situations, and therefore increase safety in traffic. Lane changes on highways represent particularly critical situations, as human misconduct can lead to major consequences at such high speeds. In order to further develop driving assistance systems more knowledge about human driving behavior and driving cognition is required. In lack of a standard procedure to study the motoric, perceptual and cognitive processes, which occur while driving, a CPM-GOMS analysis was conducted and examined regarding content and methodical suitability. For this purpose the driving behavior of three subjects was recorded during three different lane-changing maneuvers on a two-lane highway. Afterwards operators for the motoric and perceptual processes were elaborated and applied to the evaluation of the driving-data. Via a descriptive analysis certain operator traits and their similarities and differences during the lane changes were defined. The results show that although the CPM-GOMS analysis is principally suitable for the elaboration of motoric and perceptual processes, splitting certain operators and using additional systems and methods to record the driving behavior could lead to a higher consistency in results.

Keywords: CPM-GOMS, Lane changes, Driver behavior

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr. Rainer Höger und Dipl.-Psych. David Käthner für ihr Engagement und ihre Betreuung. Weiterer Dank gilt Dr. Klas Ihme, Niklas Andree, Max Friedrich, Sara Holzapfel, Michelle Kamps und dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. für die Unterstützung bei der Anfertigung meiner Bachelorarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	2
Abstract.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis	7
1 Einleitung.....	8
2 Theoretischer Hintergrund.....	9
2.1 Problemstellung	9
2.2 Forschungsstand	12
2.3 GOMS-Methode	17
2.4 Ressourcen.....	19
2.4.1 Motorische Ressourcen	19
2.4.2 Perzeptuelle Ressourcen.....	21
2.4.3 Kognitive Ressourcen	21
2.5 Forschungsfrage	22
3 Methode.....	24
3.1 Versuchsaufbau	24
3.2 Versuchsdurchführung.....	27
3.3 Stichprobe	29
3.4 Datenaufbereitung und Datenannotation	29
4 Datenauswertung und Ergebnisse.....	32
4.1 Auswertung	32
4.1.1 Motorische Operatoren.....	35
4.1.2 Perzeptuelle Operatoren.....	41
4.2 Ergebnisse.....	46
4.2.1 Rechter und linker Fuß.....	47
4.2.2 Rechte und linke Hand	50
4.2.3 Augen und Kopf.....	51
4.2.4 Visuelles System	54
4.3 Grundlagen für die Aufstellung kognitiver Operatoren	57
5 Diskussion.....	62
5.1 Kritik.....	62

Inhaltsverzeichnis	6
5.2 Implikationen für Theorie und Praxis	65
5.3 Fazit.....	66
6 Literaturverzeichnis.....	68
Anhangsverzeichnis.....	73
Anhang.....	74
Eidesstattliche Erklärung	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. <i>Das ViewCar (DLR, 2015).</i>	24
Abbildung 2. <i>Die Positionen der im Fahrzeug installierten Kameras.</i>	25
Abbildung 3. <i>Bildschirmfoto der Kameraaufnahmen mit Sicht auf den Fahrer.</i>	26
Abbildung 4. <i>Bildschirmfoto der Kameraaufnahmen mit Sicht in die Umgebung.</i>	26
Abbildung 5. <i>Die Versuchsstrecke.</i>	27
Abbildung 6. <i>Die verschiedenen Spurwechseltypen.</i>	33
Abbildung 7. <i>Die Trajektorie eines Spurwechselmanövers und die Formeln zur Bestimmung ihrer drei Phasen</i>	35
Abbildung 8. <i>Die Umgebungsmatrix.</i>	43
Abbildung 9. <i>Die absoluten Häufigkeiten der Operatoren des rechten Fußes pro Spurwechseltyp und Phase.</i>	48
Abbildung 10. <i>Die Häufigkeitsverteilung der Operatordauern des rechten Fußes pro Spurwechseltyp und Phase.</i>	49
Abbildung 11. <i>Die Häufigkeitsverteilungen der Lenkoperatoren pro Spurwechseltyp...</i>	51
Abbildung 12. <i>Die Häufigkeitsverteilungen der Operatordauern der Augen pro Spurwechseltyp und Phase.</i>	53
Abbildung 13. <i>Die absoluten Häufigkeiten der Operatordauern des visuellen Systems pro Spurwechseltyp und Phase.</i>	55
Abbildung 14. <i>Die Häufigkeitsverteilungen der Operatordauern des visuellen Systems pro Spurwechseltyp und Phase</i>	56
Abbildung 15. <i>Der zeitliche Operatorverlauf der Versuchsperson 1 während des ersten Spurwechselmanövers.</i>	57

1 Einleitung

Im Jahr 2014 wurden etwa 2,4 Millionen Unfälle in Deutschland registriert, bei denen 3.377 Menschen ums Leben kamen. Zwar geschehen die meisten Verkehrsunfälle innerorts (2014: 69,3%); allerdings wird der Großteil der Verkehrstoten auf Außerortsstraßen verzeichnet (2014: 59,8%), was unter anderem auf die dort herrschende erhöhte Fahrgeschwindigkeit zurückzuführen ist (Statistisches Bundesamt, 2015). Seit 1970 ist die Anzahl der Verkehrstoten um etwa 80% gesunken, während es mehr als 30% weniger Verletzte durch Verkehrsunfälle gibt. Dies ist sowohl auf damals neu eingeführte Sicherheitsmaßnahmen, wie Gurtanlegepflicht und Geschwindigkeitsbegrenzungen, zurückzuführen als auch auf die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Allerdings ist es erklärtes Ziel der Europäischen Union, die Zahl der Verkehrstoten in Deutschland von 2010 bis 2020 um weitere 40% zu senken (Statistisches Bundesamt, 2013). Da laut Statistischem Bundesamt rund 90% der Verkehrsunfälle Folge von menschlichem Fehlverhalten sind, ist es notwendig, den Menschen bei seiner Fahraufgabe auf außerörtlichen Straßen besser zu unterstützen. Um dies zu erreichen, bedarf es einer Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen, durch welche kritische Fahrsituationen und Unfälle vermieden werden können. Da Spurwechselmanöver einen wesentlichen Anteil der Fahraufgabe bei außerörtlichen Autofahrten ausmachen, stellen sie wichtige Verkehrssituationen dar, in denen der Fahrer unterstützt werden sollte (Lee, Olsen & Wierwille, 2004).

Um Fahrerassistenzsysteme noch effektiver gestalten zu können, ist ein Verständnis des menschlichen Fahrverhaltens und der damit einhergehenden Fahrerkognition von grundlegender Bedeutung. Das Bestreben dieser Arbeit liegt darin, einen Weg zu finden, das bei Spurwechselmanövern auftretende Fahrverhalten und die zugrundeliegenden motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse zu verstehen. Hierfür wurde das Fahrverhalten von drei Versuchspersonen bei unterschiedlichen Spurwechseltypen aufgezeichnet und das Verfahren der CPM-GOMS-Analyse so angepasst, dass es für die Auswertung der empirischen Daten genutzt werden konnte. Dies ermöglichte es, die Eigenschaften und Abfolgen der psychischen Prozesse zu erarbeiten und so ein tieferes Verständnis des Fahrverhaltens bei Spurwechselmanövern zu gewinnen.

2 Theoretischer Hintergrund

Zunächst soll der zu Grunde gelegte theoretische Hintergrund erläutert werden.

2.1 Problemstellung

Das Führen eines Kraftfahrzeugs stellt eine sehr komplexe Aufgabe dar. Hierbei geht es nicht nur um die Steuerung des Fahrzeugs, sondern auch um äußere Faktoren, die möglicherweise Einfluss auf das Fahrverhalten haben. Laut Fastenmeier und Gstalter (2003) spielt sich der Verkehr in einem komplexen System ab, welches aus den Komponenten Verkehrslenkung, Verkehrssituation, Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge besteht. Bei der Fahraufgabe kann zwischen primären und sekundären Teilaufgaben differenziert werden. Die primären Teilaufgaben beschäftigen sich mit der Fahrzeugsteuerung. Hierzu zählen unter anderem das Spurhalten, die Abstandregulierung und die Navigation. Der Autofahrer muss also unter Vorgabe einer Geschwindigkeitsbegrenzung und in einer bestimmten Verkehrsumgebung sein Fahrziel erreichen, wobei er viele Einflussfaktoren, wie Fahrzeugeigenschaften und Verkehrsregeln, berücksichtigen muss. Die sekundären Teilaufgaben können ebenfalls unterschieden werden: Es gibt Teilaufgaben, die einen direkten Bezug zum Fahren haben, wie beispielsweise die Verständigung mit den übrigen Verkehrsteilnehmern durch das Betätigen des Blinkers, oder die Informationssuche durch Blick in den Außenspiegel. Daneben gibt es Teilaufgaben, die keinen direkten Bezug zum Fahren haben. Hierbei geht es hauptsächlich um Tätigkeiten, die der Komforterhöhung im Fahrzeug dienen, wie das Einschalten des Radios oder die Kommunikation mit dem Beifahrer (Vollrath & Krems, 2011).

Im Bereich der Verkehrsforschung wurden viele verschiedene Modelle zur Analyse der Fahraufgabe entwickelt. Eines der bekanntesten Modelle zur Beschreibung der primären Fahraufgabe ist das im Jahre 1985 vorgestellte hierarchische Drei-Ebenen-Modell von Michon, welches die Fahraufgabe in eine strategische, eine Manöver- und eine Kontrollebene einteilt (Michon, 1985). Laut Kramer (1986) lassen sich die Anforderungsformen der Fahraufgabe den Ebenen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung zuordnen, denen die Aktivitäten Organisation, Koordination und Regelung auf Seiten der Fahrzeugführung gegenüberstehen. Fastenmeier und Gstalter (2002) sprechen von einer „Grundfahraufgabe“, die sich aus Navigations- und

Stabilisierungsaufgaben zusammensetzt. Hierbei geht es zum einen darum, ein definiertes Ziel zu erreichen, und zum anderen um das Einhalten von Sollspur und Sollgeschwindigkeit. Die Aufgaben der Bahnführungsebene sind abhängig von situativen Merkmalen, also der gegenwärtigen Verkehrslage.

Um die beschriebene Komplexität der Fahraufgabe und das menschliche Verhalten im Verkehr besser verstehen und erforschen zu können, entwickelte sich die Verkehrspsychologie als Teilgebiet der angewandten Psychologie. Die Forschung bezüglich des Fahrverhaltens und der zugrunde liegenden psychischen Prozesse sowie die Unfallforschung sind prominente Forschungsgegenstände der Verkehrspsychologie. Sie tragen zum Erreichen eines der Hauptziele der Verkehrspsychologie bei, der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen (Gstalter, 2002; Vollrath & Krems, 2011). Fahrerassistenzsysteme sollen die Sicherheit im Straßenverkehr erheblich verbessern. Dies soll unter anderem durch die Entlastung des Fahrers und die Verminderung und Milderung von potentiellen Fehlhandlungen erreicht werden. Außerdem sollen sie dazu beitragen die Leistungsfähigkeit, die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit des Straßenverkehrs zu erhöhen. Sie werden also besonders in jenen Situationen benötigt, in denen die Belastung des Menschen sehr hoch ist, beispielsweise aufgrund von Zeitdruck, hoher Verkehrsauslastung und hohen Geschwindigkeiten (Winner, Hakuli & Wolf, 2009). Das Fahren auf Autobahnen und die damit einhergehenden Spurwechselmanöver, welche oftmals solche Belastungssituationen darstellen, werden bereits durch Fahrerassistenzsysteme unterstützt (Salvucci & Liu, 2002; Henning, Georgeon, Wynn & Krems, 2008). So bietet der Automobilhersteller BMW beispielsweise die *Driving Assistant Plus* Ausstattung an, welche über eine Auffahrwarnung, eine Spurverlassenswarnung und eine Geschwindigkeitsregelung mit Stop & Go-Funktion verfügt (BMW AG, 2013). Allerdings sind die bereits existierenden Fahrerassistenzsysteme bisher noch nicht auf den Umgang mit komplexen Situationen ausgelegt, die aber einen wesentlichen Bestandteil des Straßenverkehrs ausmachen. Einige Spurhalteassistenten, welche den Autofahrer warnen, sobald dieser den Fahrstreifen verlässt, schlagen auch bei bewusstem Verlassen der Spur aufgrund geplanter Spurwechsel Alarm (Henning et al., 2008). Damit Fahrerassistenzsysteme den Fahrer in komplexen Situationen wie

Spurwechselmanövern besser unterstützen können, ist ein größeres Verständnis der dafür relevanten Kognition von erheblicher Bedeutung.

Ist von einem Spurwechsel die Rede, so weist dies auf eine bewusste Positionsänderung des Fahrzeugs hin. Hierbei handelt es sich um eine „räumliche Neupositionierung eines Fahrzeugs innerhalb eines gewissen Zeitraums, wobei das Fahrzeug den bisher befahrenen Fahrstreifen verlässt und auf einem benachbarten Fahrstreifen die Fahrt fortsetzt“ (Fastenmeier, Hinderer, Lehnig & Gstalter, 2001, S. 16). McKnight und Adams (1970) definieren ein Spurwechselmanöver als eine Aneinanderreihung von Aktionen, beginnend mit der Motivation, die Spur zu wechseln, beispielsweise durch ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug, um die eigene Geschwindigkeit beibehalten zu können. Hierauf folgt die Informationssuche in der momentanen Verkehrssituation und die Entscheidung, ob das Spurwechselmanöver ausgeführt wird oder nicht (Lee et al., 2004; McKnight & Adams, 1970).

Bei der Entwicklung eines Fahrerassistenzsystems für solche Fahrmanöver „bleibt der Fahrer die zentrale Komponente im Fahrer-Fahrzeug-System“ (Fastenmeier & Gstalter, 2003, S. 198). Daher ist es notwendig, Kenntnisse über die bei Spurwechseln zugrunde liegenden Prozesse zu erlangen. Hierbei sind nicht nur die motorischen Prozesse von Bedeutung; auch die perzeptuellen und kognitiven Vorgänge spielen für die sichere und effektive Ausführung der Fahraufgabe eine Rolle. Um ein tieferes Verständnis für die Fahrererkennung und das daraus resultierende Fahrverhalten bei komplexen Aufgaben wie Spurwechselmanövern gewinnen zu können, bietet sich die Anwendung von Aufgabenanalysen an. So kann die Fahrtätigkeit in Einheiten zerlegt und die Anforderungen an den Fahrer bestimmt werden (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Außerdem können Aufgabenanalysen Aufschluss über das Situationsbewusstsein des Autofahrers geben, da, je nach Verhalten, Rückschlüsse darauf gezogen werden können, ob eine Person die Umgebungsobjekte und –informationen wahrgenommen, verstanden und ihr weiteres Handeln auf diese abgestimmt hat (Endsley, 1995).

Aus der beschriebenen Problemstellung ergibt sich die Forschungsfrage dieser Arbeit, inwiefern sich ein aufgabenanalytisches Vorgehen für die Untersuchung und Beschreibung motorischer, perzeptueller und kognitiver Prozesse bei Spurwechseln

eignet. Das Ziel dieser Arbeit liegt hierbei nicht darin, eine vollständig neue Methodik zur Analyse der Spurwechselaufgabe zu erarbeiten. Stattdessen sucht sie einen Weg, eine bereits bestehende Methode so auf empirische Daten anzuwenden, dass diese bestmöglich analysiert und beschrieben werden können. Nachdem verschiedene Aufgabenanalysen betrachtet wurden, schien die CPM-GOMS-Methode als passende Variante, welche auf ihre Anwendbarkeit überprüft werden soll.

Es soll nun zunächst der aktuelle Forschungsstand auf diesem Gebiet vorgestellt werden. Daran schließt sich eine Beschreibung der CPM-GOMS-Methode an, die im Zuge dieser Arbeit angewandt wurde. Es folgt eine detaillierte Beschreibung der Forschungsfrage sowie der sich daraus ergebenden konkreten Forschungsziele der vorliegenden Arbeit.

2.2 Forschungsstand

Im Bereich der Verkehrspsychologie hat man sich in der Vergangenheit bereits mehrfach der Methodik der Aufgabenanalyse bedient, um Informationen über das Fahrverhalten und die unterschiedlichen Fahraufgaben zu erlangen.

Eine der ersten Aufgabenanalysen wurde zu Beginn der 1970er Jahre von McKnight und Adams durchgeführt und diente der Entwicklung und Evaluation von Fahrausbildungsprogrammen für junge Autofahrer (McKnight & Adams, 1970). Eine Analyse des gesamten Transportsystems, insbesondere des Fahrers und seiner vielfältigen Fahraufgaben, ermöglichte es, verschiedene Verhaltensweisen von Fahrern zu identifizieren und in Hinblick auf ihre Gefährlichkeit zu bewerten. So konnten kritische Fahrverhaltensweisen bestimmt und lehrreiche Fahrziele abgeleitet werden.

In Anlehnung an die Arbeit von McKnight und Adams entwickelten Walker, Stanton und Young (2001) ein Werkzeug, um mehr über die Struktur der Fahraufgabe zu erfahren. Dieses *Hierarchical Task Analysis of Driving Research Tool* teilt die verschiedenen Fahraufgaben in fünf unterschiedliche Verhaltensstufen ein, die sich von einfachen motorischen Aufgaben bis hin zu komplexen kognitiven Aufgaben bewegen. Das Forschungstool ermöglicht es, die bei Autofahrern auftretenden kognitiven Prozesse während der verschiedenen Fahraufgaben aufzudecken und sie zu modellieren.

Allen, Lunenfeld und Alexander (1971) haben eine vergleichbare Methodik angewendet, um herauszufinden, wie die Fahraufgabe und ihre Teilaufgaben zusammenhängen und welche Informationen vom Fahrer benötigt werden, um diese auszuführen. Mithilfe einer Aufgabenanalyse wurde die Fahraufgabe zunächst in ihre Teilaufgaben zerlegt und kategorisiert. Daraufhin konnten die für die Teilaufgaben benötigten Informationen identifiziert und eine Struktur der Fahraufgabe aufgestellt werden. Die Autoren ordneten die Teilaufgaben in einer hierarchischen Struktur an, die große Ähnlichkeit zu dem Drei-Ebenen-Modell des Fahrverhaltens von Michon (1985) aufweist. Die erfolgreiche Ausführung der Teilaufgaben der niedrigsten Stufe und die hierfür benötigten Informationen sind also notwendig, um die Aufgaben der höheren Stufen verrichten zu können. Die Ergebnisse dieser Studie dienen der Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen, da sie Aufschluss darüber geben, welche Informationen dem Fahrer zur sicheren und effektiven Ausführung der Fahraufgabe bereitgestellt werden müssen (Allen et al., 1971).

Ward, Hancock, Ganey und Szalma (2003) gehen noch einen Schritt weiter und unterbreiten den Vorschlag, die kognitiven und perzeptiv-motorischen Anforderungen von Fahraufgaben mittels einer Kombination aus kognitiver Aufgabenanalyse und der *Naturalistic Decision Making-Methode* zu erörtern. Hierdurch kann die Fahrleistung in realen Situationen bei unterschiedlich komplexen und belastenden Fahraufgaben erforscht und bewertet werden (Ward et al., 2003).

Auch Fastenmeier und Gstalter (2003) entwickelten mangels eines Standardverfahrens eine neue Methodik zur Fahraufgabenanalyse, die *Situative Anforderungsanalyse von Fahraufgaben (SAFE)*. Diese hat es zum Ziel, Anforderungslisten für verschiedene Fahraufgaben zu erstellen, welche zukünftig unter anderem von Fahrerassistenzsystemen unterstützt werden könnten. Auch hierbei wird die Fahraufgabe zunächst in ihre Teilaufgaben zerlegt. Nach einer chronologischen Anordnung und einer räumlichen Segmentierung wird dann, unter Berücksichtigung der Informationsverarbeitungsprozesse, für jede Teilaufgabe eine Anforderungsanalyse erstellt. Abschließend werden typische Fehler erörtert und die Teilaufgaben werden in Hinblick auf deren Komplexitäts- und Risikograd bewertet, um ein Entlastungspotential durch Fahrerassistenzsysteme zu ermitteln (Fastenmeier & Gstalter, 2003).

Im Jahr 2006 wurde die erste der Autorin bekannte Aufgabenanalyse im Bereich der Verkehrsforschung durchgeführt, bei der sowohl motorische, perzeptuelle, und kognitive Teilaufgaben bei der Fahraufgabe erörtert wurden, um so mögliche Informationsverarbeitungsengpässe bei bestimmten Kreuzungsszenarien zu identifizieren. Informationsverarbeitungsengpässe ergeben sich in verschiedenen Situationen, in denen Fahrer möglicherweise einer Überlastung durch Informationen ausgesetzt sind. Hierzu haben Richard, Campbell und Brown (2006) eine Aufgabenanalyse anhand von sieben verschiedenen Fahrszenarien durchgeführt. Sie unterteilten zunächst die Szenarien in Aufgaben, Teilaufgaben und Segmente, woraufhin die motorischen, perzeptuellen und kognitiven Informationsverarbeitungsanforderungen der einzelnen Teilaufgaben erarbeitet wurden. Es wurden fünf Teilaufgaben erörtert, bei denen es zu bedeutsamen Informationsverarbeitungsengpässen kommen kann. Dafür nahmen die Autoren Schätzungen zur Arbeitsbelastung und Analysen des zeitlichen Aufgabenverlaufs vor. Zudem identifizierten sie potentielle Faktoren, welche Verarbeitungsengpässe mindern beziehungsweise verstärken. Die fünf Teilaufgaben umfassten Spurwechselmanöver, Entscheidungen, bestimmte Fahrmanöver fortzuführen, Einfahrt in eine Kreuzung, Vorbereitung auf ein Abbiegemanöver und Ausführung eines Abbiegemanövers. Bei diesen komplexen Fahraufgaben kann es aufgrund mangelnder Verarbeitungsressourcen zu Qualitätsminderungen bei der Ausführung von Teilaufgaben bis hin zur Auslassung der Aufgabenausführung kommen. Dies sind Teilaufgaben, die von Fahrerassistenzsystemen unterstützt werden könnten (Richard et al., 2006).

Als Erweiterung der Arbeit von Richard et al. führten Lichty und Campbell (2012) eine vergleichbare Studie durch, bei der sie mithilfe einer ähnlich strukturierten Fahraufgabenanalyse die Aufgabenanforderungen in verschiedenen Straßenabschnitten erörterten, um die Ergebnisse in die Gestaltung von Fahrbahnen mit einfließen zu lassen.

Die beschriebenen Studien zeigen verschiedene Herangehensweisen, im Rahmen der Verkehrspsychologie die Fahraufgabe mittels einer Aufgabenanalyse zu untersuchten. Allerdings lag der Fokus hierbei meist auf dem allgemeinen Fahrverhalten. Zwar wurde auch das Fahrverhalten bei Autobahnfahrten und den

damit einhergehenden Spurwechselmanövern in der Vergangenheit erforscht; jedoch beschränken sich bisherige Forschungsarbeiten in dieser Hinsicht auf ein Minimum und basieren nur eingeschränkt auf empirischen Daten.

Henning, Georgeon, Wynn und Krems (2008) führten beispielsweise eine Studie durch, um potentielle Umgebungs- und Verhaltensindikatoren zu bestimmen, welche die Absicht eines Spurwechselmanövers prognostizieren. Als weiteres Ziel der Studie galt es, herauszufinden, an welcher Position sich diese Indikatoren während des Ablaufs eines Spurwechselmanövers befinden. Ergebnis war, dass alle der 194 untersuchten Spurwechselmanöver aufgrund eines langsam vorausfahrenden Fahrzeugs stattfanden. Der Blick in den Seitenspiegel war hierbei der Hauptindikator, um ein Spurwechselmanöver vorherzusagen. Dieser wurde bei 99% der Spurwechselmanöver ausgeübt und fand in 87,1% der Fälle vor dem Aufleuchten des Blinkers statt, was den zweiten wesentlichen Indikator ausmachte. Zwar erwiesen sich diese beiden Indikatoren als zuverlässig, um ein Spurwechselmanöver vorherzusagen, allerdings konnten die Autoren keine vergleichbaren Daten in anderen Studien finden, was bedeuten könnte, dass die Häufigkeiten des Auftretens der Indikatoren eventuell durch externe Faktoren, wie beispielsweise die Präsenz des Versuchsleiters, verfälscht worden waren. Bei einer ähnlichen Studie von Lee et al. (2004) wurde der Blinker beispielsweise nur in maximal 44% der Fälle betätigt. Außerdem, so Henning et al., tritt der Blick in den Seitenspiegel auch dann auf, wenn der Fahrer nicht die Intention hat, die Spur zu wechseln.

Fastenmeier et al. (2001) konzentrierten sich in ihrer Studie auf grundlegende Aspekte von Spurwechselsituationen, um die Ergebnisse, ähnlich wie Henning et al., in die Entwicklung von Spurwechselassistenten mit einfließen zu lassen. Es wurde ein Klassifikationssystem für Spurwechselmanöver entwickelt, mit welchem „unterschiedliche Verkehrssituationen systematisch nach Merkmalen gegliedert und zu Klassen [...] zusammengefasst werden können“ (Fastenmeier et al., 2001, S. 16). Insgesamt wurden 16 verschiedene Spurwechsel-Typen erarbeitet, welche wiederum aufgrund der Verknüpfung von Spurwechsel-Typ, Spurwechsel-Anlass und Spurwechsel-Richtung in vier Spurwechsel-Klassen aufgeteilt werden konnten. Bei einer Feldstudie wurden 1095 Spurwechselmanöver aufgezeichnet und untersucht. Hierbei ergab sich, dass Manöver der Spurwechsel-Klasse „Ausscheren zwischen zwei

Fahrzeugen“ am häufigsten vorkommen, während die wenigsten der beobachteten Manöver der Spurwechsel-Klasse „Wegscheren vor Nachfahrer“ zuzuordnen sind. Es wurde ebenfalls herausgefunden, dass Spurwechselmanöver ohne vorausfahrendes Fahrzeug auf der Zielspur am längsten dauern, während die kürzeste Dauer solche Spurwechselmanöver aufweisen, bei denen sich das Fahrzeug nach- oder vorordnet. Der Anlass eines Spurwechselmanövers ist in der Regel freiwillig, beispielsweise nach Beendigung eines Überholmanövers oder aufgrund der Neuwahl des Fahrstreifens.

Im Rahmen der Studie „Lane change manoeuvres and safety margins“ untersuchten Winsum, Waard und Brookhuis (1999) die Beziehung zwischen perzeptuellen Informationen und der motorischen Antwortorganisation bei Spurwechselmanövern. In einer Simulatorstudie wurden Spurwechselmanöver zunächst in drei Phasen unterteilt. Die Autoren untersuchten die Zeiträume, die Lenkradausrichtungen und die *time-to-line-crossing*¹ jeder Phase dahingehend, inwiefern Probanden das Ergebnis der Phasen für die Ausführung der jeweils nächsten einsetzten. Sie beobachteten, dass visuelles Feedback für die Anpassung von Lenkbewegungen an das Ergebnis vorangegangener Aktionen, mit dem Ziel der Einhaltung von Sicherheitsabständen, genutzt wird. Die Steuerung der motorischen Bewegung bei der Aufgabenausführung geschieht also unter Verwendung perzeptueller Informationen über die Positionierung des Fahrzeugs im Fahrstreifen.

Eine derjenigen dieser Arbeit am ehesten vergleichbare Thematik wurde in der Studie „The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior“ von Salvucci und Liu (2002) analysiert. So war es Ziel dieser Studie herauszufinden, wann und wie Autofahrer einen Spurwechsel vollziehen, und welche motorischen und perzeptuellen Prozesse bei diesem Manöver involviert sind. Die Autoren konnten ihre Annahme darüber bestätigen, dass das Lenkmuster bei Spurwechselmanövern sinusförmig abläuft und die Autofahrer zwei bis drei Sekunden vor Beginn des Manövers in die entgegengesetzte Richtung lenken. Außerdem wurde herausgefunden, dass die Geschwindigkeit vor dem Überholen eines langsameren vorausfahrenden Fahrzeugs leicht abgesenkt wird. Die Geschwindigkeit steigt allerdings sofort wieder an, sobald das Spurwechselmanöver abgeschlossen ist und

¹ Unter *time-to-line crossing* versteht man die Zeit, die ein Autofahrer hat, bevor ein Teil des Autos die Fahrstreifenbegrenzungen erreicht. Eine formale Definition befindet sich im Anhang A.

bleibt bestehen, bis der Wechsel auf die ursprüngliche Spur beginnt. Im Zuge dieser Studie wurden auch die Augenbewegungen während eines Spurwechselmanövers untersucht. Hierbei wurde unter anderem festgestellt, dass sich der Blick der Autofahrer durchschnittlich etwa fünf Sekunden vor Beginn des Manövers erstmals von dem momentanen Fahrstreifen wegbewegt, während er sich sofort nach Beginn des Manövers auf die Zielfahrs pur verlagert (Salvucci & Liu, 2002).

Die in diesem Kapitel beschriebenen Forschungsergebnisse sind beziehungsweise waren sehr nützlich für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und Automatisierungstechniken, da sie das Verhalten beim Ausführen eines Spurwechselmanövers ausgehend von der Fahraufgabe strukturieren. Allerdings sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, besonders in Hinblick auf die Fahrerkognition. Die kognitiven Prozesse, welche beim Fahren von Spurwechseln einsetzen, müssen erforscht werden, damit Fahrerassistenzsysteme zukünftig ein noch sichereres und effizienteres Fahren ermöglichen. Wie die beschriebenen Studien zeigen, gibt es bisher kein etabliertes Verfahren, wie man komplexe Situationen mit Rücksicht auf die zu erfüllende Fahraufgabe nachvollziehen kann. Daher wurde die Anwendbarkeit einer Methodik untersucht, die in der Verkehrsforschung bislang wenig Beachtung gefunden hat. Diese Methodik wird im folgenden Kapitel beschrieben.

2.3 GOMS-Methode

Die GOMS-Analyse wurde zur Beantwortung der Forschungsfrage erprobt, da diese Methode auf empirische Daten angewendet werden kann und die motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse und das damit einhergehende Verhalten beim Erledigen von Aufgaben betrachtet.

GOMS ist eine Technik zur Analyse, Vorhersage und kognitiven Modellierung von menschlichem Verhalten. Sie wurde seit Anfang der 1980er Jahre von Stuart K. Card, Thomas P. Moran und Allan Newell entwickelt und ursprünglich in komplexen Systemen der Mensch-Computer-Interaktion angewendet. Einsatzzwecke waren die Überprüfung von Systemfunktionalität, die Vorhersage von Aufgabenausführung durch Nutzer sowie die Unterstützung von Systemfunktionsentwicklung (Olsen & Olsen, 1990; John & Kieras, 1996).

Die Abkürzung GOMS steht für *goals, operators, methods* und *selection rules*. Das beim Ausführen einer Aufgabe gezeigte Verhalten wird bei der Modellierung in diese Elemente zerlegt. Hierbei stehen *goals* für die Ziele, die der Benutzer bei der Abwicklung einer Aufgabe verfolgt. Diese Ziele können in Teilziele zerlegt und hierarchisch angeordnet werden. Es kann sich sowohl um abstrakte Ziele, wie das Schreiben eines Textes handeln, als auch um hochdetaillierte Ziele, wie das Löschen eines Wortes (Card, Moran & Newell, 1983). Die *operators* sind die motorischen, perzeptuellen und kognitiven Aktionen, die der Benutzer zum Erreichen eines Ziels ausführt. Sie werden durch das System bestimmt und weisen alle eine festgelegte Anwendungsdauer auf. Unter *methods* versteht man Methoden, welche aus Ketten von Operatoren oder Teilzielen bestehen, die zusammen zur erfolgreichen Aufgabenerfüllung führen. Sie beschreiben also, wie ein Ziel erreicht werden kann. Gibt es mehr als eine Methode, mit der die Aufgabe erfüllt werden kann, so müssen *selection rules*, Regeln für die situationsadäquate Methodenauswahl, angewandt werden. Diese spiegeln das Wissen eines Nutzers zum Erreichen eines Ziels wider (Card et al., 1983; John & Kieras, 1996).

Insgesamt gibt es vier Varianten der GOMS-Analyse: *CMN-GOMS* ist das ursprüngliche Modell, bei dem die Abkürzung für die Namen der Autoren, Card, Moran und Newell, steht. Eine vereinfachte Version ist das *Keystroke-Level Model (KLM)*, das nur die Operatoren in Betracht zieht, während Methoden, Ziele und Auswahlregeln nicht berücksichtigt werden. Die *Natural GOMS Language (NGOMSL)* ist die Weiterentwicklung von *CMN-GOMS* und ist eine Sprache, mit der ein GOMS-Modell aufgebaut werden kann. Zur Beantwortung der Forschungsfrage dieser Arbeit wurde die vierte Variante der GOMS-Familie herangezogen, die *CPM-GOMS*-Variante.

Das CPM-GOMS-Modell basiert auf Grundlagen des *Model Human Processor*, einer ähnlichen Modellierungstechnik, welche drei Jahre zuvor von denselben Autoren entworfen wurde und den Menschen als ein informationsverarbeitendes System modelliert, bestehend aus einem motorischen, einem perzeptuellen und einem kognitiven Subsystem (Card, Moran & Newell, 1986; John & Kieras, 1996). CPM-GOMS steht dabei für *cognitive, perceptual* und *motor*, da die Operatoren, welche das menschliche Verhalten ausmachen, parallellaufenden kognitiven, perzeptuellen und motorischen Ressourcen zugeordnet werden. Diese parallellaufenden Operatoren

werden mittels eines Ablaufdiagramms (PERT-Chart) dargestellt, wobei jeder Operator durch eine Box mit entsprechender Laufzeit repräsentiert wird und deren Abhängigkeiten mithilfe von Verbindungslinien aufgezeigt werden (John & Gray, 1995). Durch dieses Ablaufdiagramm kann die Zeit berechnet werden, die man maximal benötigt, um eine Aufgabe zu erledigen. Hierbei handelt es sich um den längsten Pfad innerhalb des Diagramms, welcher als kritischer Pfad bezeichnet wird. Daher steht CPM ferner für *Critical-Path-Method* (John & Kieras, 1996).

Da diese Art von Aufgabenanalyse der parallelen Struktur des Autofahrens Rechnung trägt und von empirischen Daten auf kognitive Operatoren und höherwertige Ziele schließen lässt, eignet sich das CPM-GOMS Verfahren in besonderem Maße zur Erreichung der Forschungsziele dieser Arbeit. Voraussetzung dafür, dass ein GOMS-Verfahren zur kognitiven Modellierung des Verhaltens in komplexen Systemen genutzt werden kann, ist, dass der Benutzer mit der von ihm zu erfüllenden Aufgabe vertraut ist und keine Fehler macht. Zwar handelt es sich bei der Fahraufgabe um eine sehr komplexe Aufgabe; jedoch sind die meisten Autofahrer sehr geübt. Die Voraussetzungen der GOMS-Analyse sind daher erfüllt (Wolf, Zöllner & Bubb, 2006; John & Kieras, 1996).

2.4 Ressourcen

Wie erwähnt, geht CPM-GOMS von einem Ressourcenmodell aus, bei dem die motorischen, perzeptuellen und kognitiven Aktivitäten parallellaufenden Ressourcen zugewiesen werden (John & Gray, 1995). In diesem Kapitel werden die Ressourcen definiert und ihre jeweiligen Aufgaben beschrieben, die für die Ausführung von Spurwechselmanövern benötigt und im Zuge dieser Arbeit zur Analyse der empirischen Daten verwendet wurden.

2.4.1 Motorische Ressourcen

Die offensichtlichsten Prozesse, die zum Erfüllen der Fahraufgabe beitragen, können den motorischen Ressourcen zugeordnet werden. Daher wurden jene Ressourcen beziehungsweise Körperteile festgelegt, welche beim Autofahren wichtige motorische Bewegungen ausführen: Dies sind die beiden Füße und Hände, sowie die Augen und der Kopf.

Die wichtigste Aufgabe bei der Steuerung eines Fahrzeugs liegt darin, die Geschwindigkeit so zu regulieren, dass die Fahraufgabe sicher und effizient ausgeführt werden kann. Hierfür verwendet der Autofahrer seinen rechten Fuß, indem er entweder das Gaspedal zum Beschleunigen betätigt oder das Bremspedal zum Bremsen. Auch wenn keines der beiden Pedale vom rechten Fuß bedient wird, hat dies Auswirkungen auf die Geschwindigkeit des Fahrzeugs: Wird nicht Gas gegeben, kommt es zum Beispiel durch Roll- und Luftwiderstand sowie Motorbremse ebenfalls zur Verlangsamung des Fahrzeugs. Bedingt durch die physikalischen Eigenschaften eines Verbrennungsmotors muss, sofern kein Automatikgetriebe vorhanden ist, gelegentlich der Gang gewechselt und dafür die Kupplung getreten werden. Dies ist Hauptaufgabe des linken Fußes.

Auch die beiden Hände tragen zur Fahrzeugsteuerung bei. Neben deren Hauptaufgabe, dem Lenken des Fahrzeugs, ist die rechte Hand unter anderem auch für das Betätigen des Scheibenwischers und des Schalthebels zuständig, während die linke Hand die Blinker sowie die Lichtanlage des Fahrzeugs bedient.

Für die sichere Steuerung eines Fahrzeugs werden auch die Augen bewegt. Diese Bewegungen dienen der Informationssuche und der Orientierung, laufen allerdings wesentlich schneller und sprunghafter ab als andere motorische Bewegungen. Die Augen bewegen sich in Sakkadenform, das bedeutet, sie springen sehr schnell von einem Fixationspunkt zu einem anderen (Goldstein, 2007). In der Regel dauert eine Sakkade 30-80 Millisekunden (Holmquist, Nyström, Andersson, Dewhurst, Jarodzka & Van de Weijer, 2011), wobei Cohen (1998) davon ausgeht, dass die Fixationsdauer mit zunehmender Geschwindigkeit und der damit einhergehenden erhöhten Informationsdichte und Komplexität, abnimmt. Auch Bewegungen des Kopfes sind notwendig, damit die Informationssuche beim Autofahren bestmöglich ablaufen kann. Entweder bewegt sich der Kopf, damit ein relevantes Objekt fokussiert werden kann, das sich nicht im momentanen Blickfeld des visuellen Systems befindet, oder er hat eine gewisse Position eingenommen, während ein Objekt oder mehrere im Gesichtsfeld fokussiert werden.

2.4.2 Perzeptuelle Ressourcen

Die Erörterung perzeptueller Ressourcen beschränkt sich in dieser Arbeit auf das visuelle System. Denn dieses ist beim Autofahren das wichtigste Sinnesorgan; es nimmt den Großteil der für die Fahraufgabe relevanten Informationen auf (Diem, 2004; Vollrath & Krems, 2011). Da die Kapazität des visuellen Systems und des Arbeitsgedächtnisses durch die Fülle zu bewältigender Informationen überschritten wird, ist das kognitive System beim Autofahren besonders auf selektive Aufmerksamkeit angewiesen. Hierbei richtet der Fahrer seine Aufmerksamkeit auf die für ihn und die Fahraufgabe relevanten Informationen (Groeger, 2000).

Auditive Reize haben beim Autofahren in der Regel einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Fahrverhalten bei Spurwechselmanövern auf Autobahnen – mit Ausnahme des Martinshorns oder der Hupe eines fremden Fahrzeugs – weshalb sie während der Versuchsfahrten nicht aufgezeichnet wurden. Somit stellt das auditive System keine Ressource der CPM-GOMS-Analyse dar.

Andere Sinnesorgane wie die Haptik oder die Somatosensorik finden bei der CPM-GOMS-Methode keine Anwendung, weswegen sie auch bei dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

2.4.3 Kognitive Ressourcen

Die Kognition bildet die letzte der parallellaufenden Ressourcen, welche für die CPM-GOMS-Analyse relevant ist. Ihr können die kognitiven Aktivitäten zugeordnet werden, die für die Informationsverarbeitung und das daraus resultierende Verhalten verantwortlich sind (Anderson, 2007). Card et al. (1986) gehen bei der Beschreibung des Model Human Processor davon aus, dass alle zwischen motorischen und perzeptuellen Prozessen stattfindenden Aktivitäten der Kognition zuzuschreiben sind. Zwar ist es nach dem multiplen Ressourcenmodell von Wickens (1984) beispielsweise denkbar, dass die Verarbeitungsprozesse verschiedenen Ressourcen zugeordnet werden können, allerdings spielt diese Annahme, bezogen auf die CPM-GOMS-Methode, keine Rolle (Sanders & McCormick, 1993). Dies ist damit zu begründen, dass bei dieser Methode nicht die Erstellung eines kognitiven Modells, sondern die eines Aufgabenmodells im Vordergrund steht. Daher wird von der vereinfachten Annahme ausgegangen, dass es nur eine kognitive Ressource gibt.

Weiter ist diese Aufspaltung der Ressourcen zur Untersuchung des CPM-GOMS-Verfahrens nicht ausschlaggebend, weshalb auch in dieser Arbeit nur von einer einheitlichen kognitiven Ressource ausgegangen wird.

2.5 Forschungsfrage

Wie in Kapitel 2.1 eingeführt, prüft diese Arbeit die Anwendbarkeit eines aufgabenanalytischen Vorgehens bei der Untersuchung und Beschreibung motorischer, perzeptueller und kognitiver Prozesse bei Spurwechseln. Hierbei soll keine neue Methodik entwickelt, sondern ein bereits bestehendes Verfahren so angepasst werden, dass es auf empirische Daten, wie Video-, Fahrzeug- und Eye-Tracking-Daten, angewendet werden kann. Dafür wird die CPM-GOMS-Methode genutzt (vgl. Kapitel 2.3). Dieses Verfahren ermöglicht es, die individuellen Methoden beziehungsweise Verhaltensweisen und die parallelen Prozesse bei Spurwechselmanövern darzustellen. Die hierarchischen Aufgabenanalysen, die in der Vergangenheit hauptsächlich angewandt wurden, konnte dies nicht leisten. Hierbei ging es lediglich um die Strukturierung von Fahraufgaben und um ein allgemeines Verständnis des Fahrverhaltens. Die Fahrererkennung wurde bislang nur selten mit betrachtet. Außerdem basieren die bisherigen Forschungsarbeiten nur bedingt auf empirischen Daten, weswegen bisher kein standardisiertes Verfahren entwickelt wurde, das auf die im Rahmen dieser Untersuchung erhobenen Daten angewendet werden könnte.

Die Forschungsfrage dieser Arbeit kann damit wie folgt definiert werden:

„In welchem Ausmaß eignet sich die CPM-GOMS-Methode für die Beschreibung der parallelen motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse bei manuell gefahrenen Spurwechseln auf Autobahnen?“

Aus dieser Frage ergeben sich folgende Forschungsziele:

1. die Eignungsbeurteilung der CPM-GOMS-Methode
2. die Aufstellung verschiedener Operatoren für motorische und perzeptuelle Prozesse mit Hilfe der entwickelten Methodik
3. die Bestimmung der Eigenschaften der jeweiligen Operatoren
4. die Festlegung von Zeitspannen für die jeweiligen Operatoren

5. die Erörterung von Gemeinsamkeiten beziehungsweise Unterschieden der Operatoreigenschaften zwischen verschiedenen Spurwechseltypen

Zum Erreichen dieser Ziele wurden die empirischen Daten von mehreren Versuchspersonen bei verschiedenen Spurwechseltypen analysiert und deskriptiv dargestellt. Da die kognitiven Prozesse sehr komplex und somit schwer zu erarbeiten sind, zählt die Aufstellung dieser Operatoren nicht zu den Zielen dieser Arbeit. Es soll lediglich ein Ausblick darauf gegeben werden, wie passende Methoden aussehen könnten.

Nach Festlegung der genannten Ziele, wurden bestimmte Erwartungen an die Untersuchung aufgestellt. Es wird beispielsweise angenommen, dass sinnvolle Zeitspannen für motorische Operatoren festgelegt werden können, da davon ausgegangen wird, dass deren Dauern unabhängig von äußeren Einflüssen relativ konstant bleiben, was einer Anforderung an Operatoren entspricht (Card et al., 1983). Demgegenüber könnten die Längen der perzeptuellen Operatoren je nach Verkehrslage und der damit einhergehenden für den Fahrer zu beachtenden relevanten Informationsmenge variieren. Des Weiteren wird eine unterschiedliche Nutzung der Operatoren je nach Spurwechseltyp erwartet.

3 Methode

Zur Erörterung der oben beschriebenen Forschungsfrage wurde eine empirische Untersuchung in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) durchgeführt, welche am 18. März 2015 am Standort in Braunschweig stattfand. Im Folgenden wird auf die methodische Vorgehensweise der Untersuchung eingegangen.

3.1 Versuchsaufbau

Für die Durchführung des Versuchs wurde das Forschungsfahrzeug ViewCar des Instituts für Verkehrssystemtechnik verwendet (vgl. Abbildung 1). Hierbei handelt es sich um ein Messfahrzeug der Marke Audi, mit welchem das Verhalten des Fahrers im Straßenverkehr detailliert und umfassend aufgezeichnet werden



Abbildung 1. Das ViewCar (DLR, 2015).

kann. Verschiedene Systeme und Sensoren dienen der Positionsbestimmung des Fahrzeugs, sowie der Messung der Verkehrsumgebung und der Fahrzeugbedienung, woraus sich das Fahrzeugverhalten ableiten lässt. Es werden unter anderem Geschwindigkeit, Gas- und Bremspedalstellung, Lenkwinkel und Lenkrichtung, Positionsveränderungen bezüglich der temporären Fahrspur und viele weitere Daten bestimmt. Diese fahrzeugbezogenen Daten können alle zeitsynchron gemessen und aufgezeichnet werden. Ebenfalls im ViewCar integriert ist ein Navigationssystem mit differentielltem GPS und Odometer zur genauen Positionsbestimmung. Ferner ermöglicht die implementierte Systemarchitektur *DOMINION*, weitere Messtechniken an das System anzubinden und deren Daten ebenfalls auf die koordinierte Weltzeit UTC synchron zu erfassen. Insgesamt zeichnet das ViewCar über 60 verschiedene Variablen der Fahrzeugbewegung auf.

Zur Messung der Blickbewegungen wurde das Mehrkamera-Eye-Tracking-System *Smart Eye Pro 6.0* verwendet. Dieses System misst die Kopfposition, Blickbewegungen

und die Pupillenweite der Versuchspersonen noninvasiv, das heißt, ein befestigtes brillen- oder helmähnliches Gestell ist nicht notwendig. Zur Datenaufzeichnung wurden drei Kameras des Systems auf dem Armaturenbrett des ViewCars installiert, die jeweils eine Aufzeichnungsrate von 120 Hertz aufweisen.

Um neben den Fahrzeug- und den Blickdaten auch Videodaten erfassen zu können, wurde zusätzlich ein Videosystem für sogenannte *naturalistic driving studies* (NDS-System) in das Fahrzeug eingebaut. So kann der Fahrer unter „normalen Bedingungen“ beobachtet und sein Verhalten bewertet werden (Noyer, Schmidt, Utesch, Waigand & Köster, 2013). Dieses Videosystem ermöglicht es, acht verschiedene Videosignale gleichzeitig aufzuzeichnen. Hierfür wurden acht Kameras in das Fahrzeug eingebaut, welche sowohl den Innenraum beziehungsweise die Versuchsperson als auch die Umgebung des Fahrzeugs filmen.

Folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Kameraperspektiven mit a) Sicht auf den Fahrer und dessen Hände am Lenkrad von der Kopfstütze des Beifahrers aus, b) Sicht auf den Fahrer vom Armaturenbrett vorne links aus, c) Sicht in den Rückspiegel von der Decke aus und somit aus derselben Höhe wie die Augen des Fahrers, d) Sicht in den Fußraum des Fahrers, e) Sicht wie die des linken Außenspiegels, f) Sicht nach hinten von rechts oben außerhalb des Fahrzeugs aus, g) Sicht nach vorne aus dem Fahrzeug und h) Sicht nach hinten aus dem Fahrzeug. Die orangefarbenen Pfeile repräsentieren jene Kameras die innerhalb des Fahrzeugs angebracht wurden, während die rotfarbigen Pfeile die Kameras außerhalb des Fahrzeugs darstellen (vgl. Abbildung 2). Im Anhang B befinden sich Fotos der im Fahrzeug eingebauten Kameras.

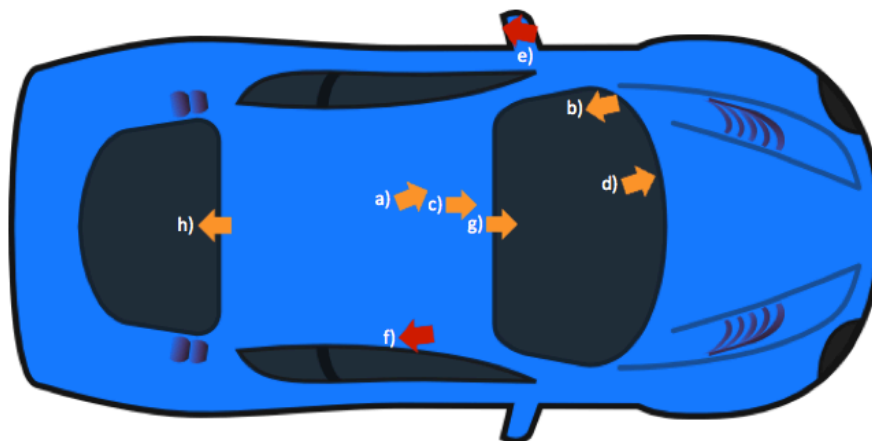


Abbildung 2. Die Positionen der im Fahrzeug installierten Kameras.

Die untenstehenden Abbildungen zeigen die Aufnahmen der verschiedenen Kameras.



Abbildung 3. Bildschirmfoto der Kameraaufnahmen mit Sicht auf den Fahrer.



Abbildung 4. Bildschirmfoto der Kameraaufnahmen mit Sicht in die Umgebung.

Die Versuchsstrecke begann am Standort des DLR in Braunschweig. Von dort aus verlief sie über die dreispurige Autobahn BAB 2 bis zum Autobahnkreuz 58 Wolfsburg/Königsutter, wo auf die zweispurige Autobahn BAB 39 in Richtung Kassel/Salzgitter gewechselt wurde. An der Ausfahrt Braunschweig-Rautheim wurde die Autobahn verlassen, um zu wenden und dieselbe Strecke zurück zum Standort des DLR zu fahren. Untenstehende Abbildung visualisiert die Fahrstrecke.



Abbildung 5. Die Versuchsstrecke.

Während der Fahrt bestand die Aufgabe der Versuchspersonen darin, lediglich ihr natürliches und gewohntes Fahrverhalten zu zeigen, um sicher vom Start- zum Endpunkt zu gelangen. Hierbei sollten die Probanden darauf achten, nicht kontinuierlich auf derselben Fahrspur zu fahren; allerdings sollten auch nicht unnatürlich viele Spurwechsel erzwungen werden. Deshalb wurde ein Geschwindigkeitsbereich von 130 bis 150 km/h instruiert, um einerseits durch langsamere Fahrzeuge auf der rechten Spur zum Überholen zu zwingen, und andererseits ein Verbleiben auf der linken Spur durch sehr schnelle Fahrt während der gesamten Zeit zu vermeiden.

3.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wurde die Versuchsperson vom Versuchsleiter begrüßt und mit dem groben Hintergrund und der Instruktion des Experiments vertraut gemacht. Außerdem wurde sie gebeten, eine Verpflichtungserklärung zu unterschreiben und

einen kurzen demographischen Fragebogen auszufüllen. Nachdem der Ablauf und eventuelle Fragen seitens des Probanden geklärt worden waren, wurde die Versuchsperson gebeten, im Fahrzeug Platz zu nehmen und gegebenenfalls die Sitzposition und die Spiegel ihren Bedürfnissen entsprechend einzustellen. Daraufhin wurde das Blickerfassungssystem für den Probanden eingestellt und kalibriert. Nach Sicherstellung, dass die installierten Systeme richtig funktionierten, startete der Versuchsleiter die Datenaufzeichnung. Da alle Versuchspersonen aufgrund ihrer Tätigkeiten am DLR bereits mit dem Messfahrzeug vertraut waren, war weder eine genaue Erläuterung des Fahrzeugs noch eine Probefahrt notwendig. Auch der Umgang mit dem Eye-Tracking-System und dem Videosystem war den Probanden bekannt, wodurch die Wahrscheinlichkeit einer eventuellen Verfälschung des natürlichen Fahrverhaltens, wie es eher bei Versuchspersonen auftreten kann, deren Fahrverhalten zum ersten Mal aufgezeichnet wird, minimiert wurde.

Bevor die Fahrt begann, wiederholte der Versuchsleiter gegenüber dem Probanden noch einmal dessen Aufgabe, so natürlich und gewohnt wie möglich die Versuchstrecke zurückzulegen. Es wurde ebenfalls wiederholt, dass der Versuch der Analyse des Fahrverhaltens bei Spurwechseln auf Autobahnen dient und dass der Proband weder während der gesamten Fahrt auf derselben Spur fahren noch unnatürlich viele Spurwechsel vornehmen sollte. Nachdem der Versuchsleiter sich versichert hatte, dass der Proband die Aufgabe verstanden und keine weiteren Fragen hatte, nahm er auf der Rückbank hinter dem Probanden Platz, von wo aus er das Blickerfassungssystem und das NDS-System kontrollieren konnte.

Während der gesamten Fahrt navigierte der Versuchsleiter die Versuchsperson. Diese musste nicht auf ein externes Navigationssystem achten, sondern sollte lediglich den mündlichen Anweisungen des Leiters folgen.

Nachdem die Versuchsperson den Standort des DLR wieder erreicht hatte, endete die Versuchsfahrt und der Versuchsleiter stoppte die Datenaufzeichnung. Daraufhin wurde die Versuchsperson gefragt, ob während der Versuchsfahrt Komplikationen aufgetreten waren oder andere Dinge ihr Fahrverhalten möglicherweise beeinflusst hatten. Anschließend wurden eventuelle Fragen des Probanden geklärt und dieser schließlich verabschiedet.

Die Gesamtdauer jedes Versuchsdurchgangs betrug etwa eine Stunde, wobei die Hälfte dieser Zeit die reine Fahrzeit im ViewCar ausmachte. Um sowohl voll befahrene Autobahnen während der Mittagszeit als auch leere Autobahnen am Morgen und am Abend zu umgehen, fanden zwei Versuchsfahrten am Vormittag und eine Versuchsfahrt am Nachmittag statt. Am Tag der Untersuchung war das Wetter sonnig bis leicht bewölkt und die Außentemperatur betrug ca. 12 °C.

3.3 Stichprobe

Bei dem beschriebenen Versuch handelt es sich um eine explorative Studie. Da es nicht dem Ziel einer solchen Studie entspricht, Populationsaussagen zu machen, war es nicht notwendig, die Untersuchung anhand einer repräsentativen Stichprobe durchzuführen. Demnach konnte eine Gelegenheitsstichprobe zur Untersuchung herangezogen werden.

Die Stichprobe bestand aus drei Versuchspersonen, wovon eine weiblich und zwei männlich waren. Die Probanden waren 23, 30 und 33 Jahre alt. Um zu garantieren, dass die Versuchspersonen mit den Video- und Eye-Tracking-Systemen und dem Messfahrzeug bereits vertraut waren, bestand die Stichprobe lediglich aus Mitarbeitern der Abteilung Automotive. So ließ sich die Wahrscheinlichkeit einer Verhaltensverzerrung auf ein Minimum senken, da davon auszugehen war, dass die im ViewCar integrierten Systeme die Versuchspersonen nicht übermäßig ablenken und diese trotz bewusster Verhaltensaufzeichnung ihr natürliches Fahrverhalten aufweisen würden.

Bei der Versuchsvorbereitung war entschieden worden, dass der Fokus bei der Auswertung nicht auf den Unterschieden zwischen einzelnen Versuchspersonen liegen sollte, sondern auf den Unterschieden zwischen den verschiedenen Spurwechseln der Versuchspersonen. Daher wurde bewusst eine geringe Anzahl an Probanden herangezogen. Außerdem ermöglicht die Durchführung mit wenigen Versuchspersonen eine genauere und kleinschrittigere Auswertung.

3.4 Datenaufbereitung und Datenannotation

Nachdem die Daten mittels NDS-System, ViewCar und Eye-Tracking-System aufgezeichnet wurden, mussten sie aufbereitet werden, damit sie anschließend

codiert beziehungsweise ausgewertet werden konnten. Die Fahrzeugrohdaten des ViewCars wurden mit dem Softwareprogramm *Dominion Data Store Control Center (DDSCC)* importiert, woraufhin erste Variablen ausgewählt wurden, welche für die Auswertung hätten nützlich sein können. Nach einer grafischen Inspektion der übrigen Variablen wurde die Liste der verwendbaren Variablen ergänzt. Anschließend wurden die Daten dieser Variablen in *Microsoft Excel* exportiert und konnten so ausgewertet werden. Einige der Fahrzeugdaten mussten mithilfe der Statistiksoftware *R* kategorisiert werden, damit sie für die Auswertung weiter verwendet und passende Operatoren aufgestellt werden konnten.

Die Videodaten des NDS-Systems wurden mithilfe der Software *VLC Media Player* aufbereitet. So war es möglich, die Videodateien nach Belieben zu steuern und jeden einzelnen Videoframe zu betrachten. Dies war notwendig, weil die Dauer mancher Operatoren nur mithilfe der Videoframes bestimmt werden konnte. Sie ließ sich nämlich nicht aus den ViewCar-Daten ableiten. Hierbei wurde die Anzahl der Videoframes abgezählt, in denen die Operatoren zum Einsatz kamen. Ein Videoframe entspricht einer Dauer von etwa 40 Millisekunden.

Da die Eye-Tracking-Daten sehr lückenhaft sind und stark von den Videodaten des NDS-Systems abweichen, konnten sie nicht zur Auswertung herangezogen werden.

Die Fahrzeug- und Videodaten wurden zunächst visuell codiert. Hierbei wurden die einzelnen Operatoren als Balken in einer horizontalen *Microsoft-Excel*-Mappe angeordnet, welche an die Länge der Spurwechselzeitspannen angepasst war. Für jedes Spurwechselmanöver wurde eine separate Mappe angelegt. Die Zeilenanzahl entsprach jeweils der Anzahl der motorischen Ressourcen. Diese Vorgehensweise erwies sich allerdings als unvorteilhaft; zum einen weil die Operatorabfolgen sehr lang wurden und so grafisch nicht anschaulich darstellbar waren; zum anderen, weil sie für die deskriptive Auswertung nicht weiterverwendet werden konnten. Da es allerdings den Zielen dieser Arbeit entspricht, die Eigenschaften und Zeitspannen der verschiedenen Operatoren zu bestimmen, folgte auf die visuelle Auswertung eine numerische. Hierbei wurde erneut die Software *Microsoft Excel* verwendet und für jedes Spurwechselmanöver eine separate Tabelle angelegt. Die Länge der Spurwechselmanöver entsprach der Zeilenanzahl in der Tabelle, wobei eine Zeile eine Millisekunde repräsentierte. In den Spalten der Tabellen wurden die jeweiligen

Ressourcen eingetragen. So konnten die verschiedenen Operatoren und deren Zeitspannen besser abgetragen werden. Wie die einzelnen Operatoren bestimmt wurden und welche Variablen der ViewCar-Daten für die Auswertung der Operatoren angewendet wurden, wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

Nach dieser numerischen Auswertung wurden die deskriptiven Werte der verschiedenen Operatoren mit dem Softwaresystem *R* berechnet und grafisch dargestellt. Hierdurch konnten mögliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Operatoreigenschaften zwischen den verschiedenen Spurwechseltypen erörtert werden, was unter anderem Ziel dieser Arbeit war.

Die Dauer der gesamten Datenbearbeitung belief sich auf etwa neun Wochen mit jeweils fünf achtstündigen Arbeitstagen. Hierbei umfasste die Datenaufbereitung etwa zwei Wochen und die Datenannotation sechs Wochen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Umgebungsrepräsentation von der Autorin selbst erstellt wurde, was bei zukünftigen Arbeiten nicht mehr notwendig wäre. Wäre das Ziel dieser Arbeit gewesen, auch die kognitiven Operatoren aufzustellen und auszuwerten, so hätte sich die Bearbeitungszeit auf weitere vier Wochen belaufen. Für die abschließende deskriptive Auswertung der Daten wurde etwa eine Woche benötigt.

4 Datenauswertung und Ergebnisse

Um die Forschungsfrage dieser Arbeit beantworten zu können, mussten, wie oben beschrieben, zunächst die bei Spurwechseln auftretenden motorischen und psychischen Prozesse anhand der empirischen Daten ausgewertet werden. Im folgenden Kapitel wird diese Datenauswertung beschrieben. Daraufhin folgt die deskriptive Analyse der jeweiligen Operatoren und der verschiedenen Spurwechseltypen. Anschließend wird ein Ausblick darauf gegeben, wie die Methoden der kognitiven Prozesse aussehen und die Operatoren erarbeitet werden könnten.

4.1 Auswertung

Wie oben bereits erwähnt, lag ein Ziel dieser Arbeit in der Betrachtung der Prozessunterschiede beziehungsweise -gemeinsamkeiten bei unterschiedlichen Spurwechseln der Personen. Um nicht neun Spurwechsel vom gleichen Typ auszuwerten (zum Beispiel der Spurwechsel von dem rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen), sondern Varianzen bei verschiedenen Spurwechseltypen festzustellen, wurden von jeder Versuchsperson drei unterschiedliche Spurwechseltypen ausgewertet.

Für die Auswertung lagen Fahrdaten von zwei verschiedenen Autobahnen vor: Daten, die auf der dreispurigen Autobahn BAB 2 aufgezeichnet wurden, und Daten der Autobahn BAB 39, einer zweispurigen Autobahn. Da davon auszugehen ist, dass bei einem Spurwechsel auf einer dreispurigen Autobahn wesentlich mehr Reize den Fahrer beziehungsweise sein Fahrverhalten beeinflussen, wurden nur Spurwechsel auf der zweispurigen Autobahn BAB 39 betrachtet. Um drei verschiedene Spurwechseltypen zu beurteilen wurden folgende drei Arten von Spurwechseln zur Auswertung herangezogen (nachfolgende Abbildung visualisiert die drei Spurwechseltypen):

1. der Spurwechsel von dem Beschleunigungsstreifen auf den rechten Fahrstreifen
2. der Spurwechsel von dem rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen
3. der Spurwechsel von dem linken Fahrstreifen auf den rechten Fahrstreifen

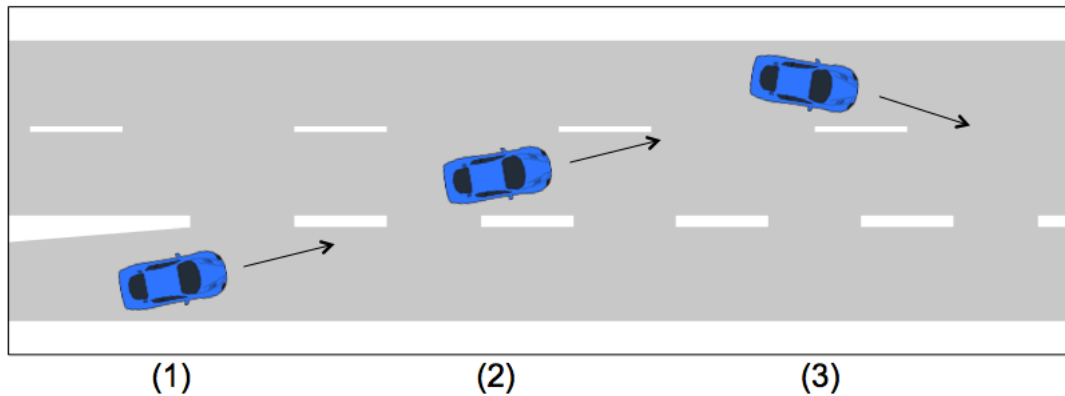


Abbildung 6. Die verschiedenen Spurwechseltypen.

Da nicht nur die Art der Spurwechsel Einfluss auf den Fahrer und sein Fahrverhalten hat, sondern auch die Umgebung und der Verlauf der Autobahn, wurde versucht, jene Spurwechsel auszuwerten, die ungefähr auf den gleichen Streckenabschnitten gefahren wurden. Bei dem ersten Typ, dem Spurwechsel von dem Beschleunigungstreifen auf den rechten Fahrstreifen, war dies selbstverständlich möglich. Es wurde der Spurwechsel ausgewählt, bei dem die Versuchsperson die BAB 39 das erste Mal nach der verlängerten Einfädelungsspur befuhr. Weiter wurden jeweils die darauffolgenden ersten Spurwechsel des zweiten und dritten Typs ausgewertet, da diese ungefähr auf derselben Höhe der Autobahn vollzogen wurden.

Zur Bestimmung des Start- und Endpunkts jedes Spurwechsels wurde auf die Daten der Querabweichung des Fahrzeugs zur Fahrstreifenmitte zurückgegriffen, die ebenfalls vom ViewCar aufgezeichnet wurden. Es wurde festgelegt, dass der eigentliche Spurwechsel beginnt, sobald die Querabweichung des Fahrzeugs zur Fahrstreifenmitte 45 cm oder mehr beträgt. Hätte man sich für einen kürzeren Abstand zur Fahrstreifenmitte entschieden, so wäre möglicherweise eine Fahrzeugbewegung als Start eines Spurwechsels identifiziert worden, obwohl es sich tatsächlich nur um eine Korrekturbewegung oder ein unabsichtliches Abdriften von dem Fahrstreifen handelte. Der Endpunkt des Spurwechsels ist, konform dazu, ebenfalls erreicht, sobald die Querabweichung des Fahrzeugs die Grenze von 45 cm zur Fahrstreifenmitte erneut erreicht hat. Da nicht nur die Prozesse während des eigentlichen Spurwechsels zur Beantwortung der Fragestellung relevant sind, sondern auch jene, die den Spurwechsel einleiten und ihm folgen, war es notwendig, die Zeitspanne der Betrachtung der Spurwechsel zu vergrößern. Aufgrund der

Tatsache, dass bei der Einleitung eines Spurwechsels wesentlich mehr Reize auf den Fahrer einwirken, sollte die Dauer vor der ersten Überquerung der Schwelle von 45 cm Schwelle am längsten ausfallen. So wurde festgelegt, dass die Fahrdaten von mindestens vier Sekunden vor, und mindestens drei Sekunden nach dem eigentlichen Spurwechsel ebenfalls betrachtet werden (vgl. Abbildung 7 Seite 35). Um relativ einheitliche Zeitspannen zu erzielen, wurden die Betrachtungszeiträume hinsichtlich der Spurwechsel jeweils auf ganze Sekunden gerundet.

Für die Bestimmung der Betrachtungszeiträume wurden zunächst Intervalle gesucht, deren zeitliche Grenzen durch eine Querabweichung von mindestens 45 cm in Richtung Zielspur ($t_{\text{während_Start}}$) beziehungsweise Startspur ($t_{\text{während_Ende}}$) definiert wurden. Die Gesamtdauer des Überfahrens der Fahrstreifenbegrenzung betrug damit:

$$t_{\text{während_gesamt}} = t_{\text{während_Ende}} - t_{\text{während_Start}}$$

Formel 1. Berechnung der Dauer der unmittelbaren Fahrstreifenwechselphase.

Die Vorphase begann mindestens 4 Sekunden vor $t_{\text{während_Start}}$, die Nachphase endete mindestens 3 Sekunden nach $t_{\text{während_Ende}}$. Für bessere Handhabbarkeit wurden diese Werte, wie bereits erwähnt, jeweils auf die nächste Ganzzahl ab- und aufgerundet (*floor* beziehungsweise *ceiling*). Die Gesamtdauer der analysierten und annotierten Phasen ergab sich daher nach folgender Formel:

Formel 2. $t_{\text{SW_gesamt}} = \lceil t_{\text{während_Ende}} + 3s \rceil - \lfloor t_{\text{während_Start}} - 4s \rfloor$ Berechnung der Gesamtdauer der analysierten Perioden.

Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel dienen: Sei $t_{\text{während_Start}} = 10,5s$ und $t_{\text{während_Ende}} = 13,5s$, dann beträgt die Gesamtdauer der analysierten Phase $t_{\text{SW_gesamt}} = \lceil 13,5s + 3s \rceil - \lfloor 10,5s - 4s \rfloor = \lceil 16,5s \rceil - \lfloor 6,5s \rfloor = 17s - 6s = 11s$.

Nachfolgende Abbildung visualisiert die Trajektorie und die verschiedenen Phasen des Spurwechselmanövers.

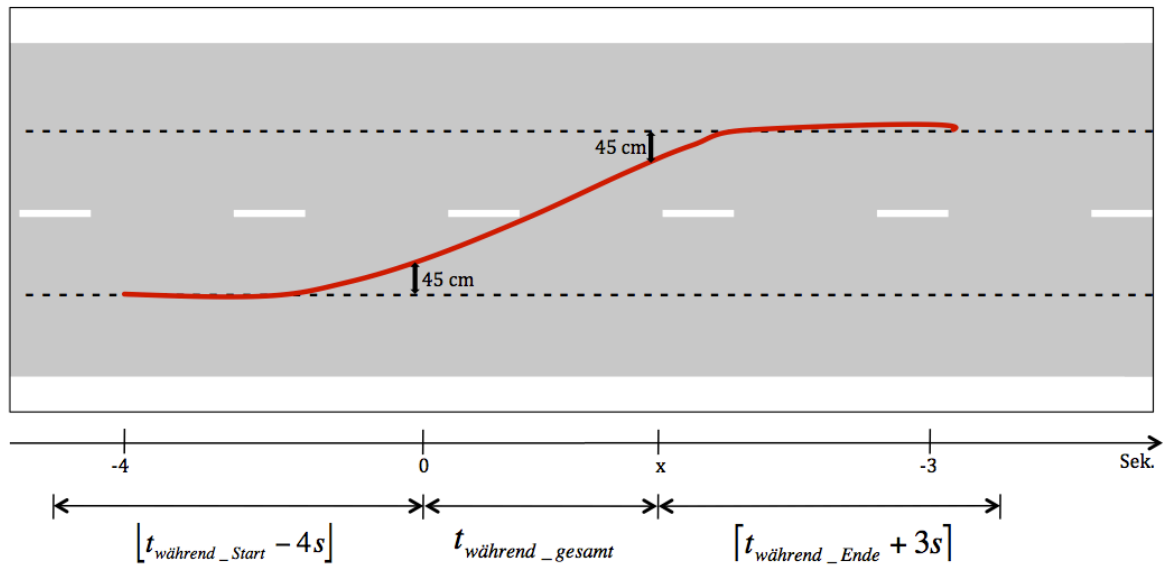


Abbildung 7. Die Trajektorie eines Spurwechselmanövers und die Formeln zur Bestimmung ihrer drei Phasen.

Um mithilfe der CPM-GOMS-Analyse Rückschlüsse auf die motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse der Versuchspersonen bei Spurwechseln auf Autobahnen ziehen zu können, wurden, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, die vom ViewCar aufgezeichneten fahrzeugbezogenen Daten und die Videodaten zur Auswertung herangezogen.

In den folgenden Unterkapiteln wird das methodische Vorgehen bei der Erarbeitung und der Auswertung der verschiedenen Operatoren beschrieben.

4.1.1 Motorische Operatoren

Da die motorischen Bewegungen die beim Autofahren offensichtlichsten Prozesse sind und Kenntnis von deren Ab- und Verlauf die Erarbeitung der perzeptuellen und kognitiven Operatoren ermöglichen, wurde mit der Auswertung dieser Operatoren begonnen. Um die für die verschiedenen Ressourcen passenden Operatoren aufstellen und charakterisieren zu können, was einem der Ziele dieser Arbeit entspricht, wurden die vom ViewCar erfassten Daten extrahiert und, je nach Körperteil, wurden die relevanten Variablen zusammen mit den Videodaten

betrachtet. Eine vollständige Liste der verwendeten Variablen und ihrer Eigenschaften befindet sich im Anhang C.

Rechter Fuß

Eine für die Auswertung des rechten Fußes wichtige Variable, die vom ViewCar erfasst wurde, ist die Variable „GASPEDALWERT“. Sie schwankt zwischen 0 und 100 Prozent und spiegelt die Stärke des Fußtritts auf das Gaspedal wider. Ebenfalls bedeutend, ist die Variable „FAHRER_BREMST“, die angibt, ob das Bremspedal betätigt wurde oder nicht (0 = Bremspedal wurde nicht betätigt; 1 = Bremspedal wurde betätigt). Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, kann die Geschwindigkeit nicht nur durch Betätigung des Brems- beziehungsweise des Gaspedals reguliert werden; es kommt ebenfalls zur Abbremsung eines Fahrzeugs, wenn keines der beiden Pedale betätigt wird. Daher müssen alle Operatoren gefunden werden, welche sich in diesen drei Situationen ergeben können. Interessant ist bei den Bewegungen des rechten Fußes nicht nur, ob das Fahrzeug beschleunigt beziehungsweise abgebremst wird, sondern ebenfalls, wie stark beschleunigt beziehungsweise abgebremst wird. Demnach ist eine Kategorisierung des Gaspedalwerts notwendig. Nach Betrachtung der Daten konnte festgestellt werden, dass der Wert der Variable „GASPEDALWERT“ nur sehr selten 50 Prozent übertritt. Daher wurden drei Kategorien festgelegt: „Leicht Gas geben“ bei einem Wert ≤ 15 Prozent ; „Mittel Gas geben“ bei einem Wert $15 \text{ Prozent} < x \leq 30$ Prozent und „Stark Gas geben“ bei einem Wert > 30 Prozent. Da die Variable „FAHRER_BREMST“ nur angibt, ob gebremst wurde, nicht aber, wie stark gebremst wurde, handelt es sich hierbei um eine nominalskalierte Variable, was bedeutet, dass keine Wertekategorien gebildet werden können. Allerdings könnte unter der Annahme, dass die Versuchsfahrten auf der Autobahn durchgeführt wurden und die Fahrzeuggeschwindigkeit demnach relativ hoch ist, davon ausgegangen werden, dass der Fahrer dann stark bremst, wenn er tatsächlich das Bremspedal tritt. Da die Wegnahme des Gasdrucks der physikalischen Verlangsamung des Fahrzeugs entspricht, könnte dies einem leichten Bremsvorgang gerecht werden.

Da nicht nur solche Operatoren notwendig sind, die Auskunft darüber geben, wie stark der Fahrer den Gaspedalwert verändert, sondern auch jene die angeben, ob der Fahrer den Gaspedalwert verändert oder ihn konstant hält, mussten zwei weitere

Operatorkategorien für den rechten Fuß gebildet werden: „Gas halten“, wenn der Gaspedalwert sich für 300 Millisekunden oder länger nicht verändert, und „Gas verändern“, wenn der Gaspedalwert vor Ablauf der 300 Millisekunden variiert. Die Dauer von mindestens 300 Millisekunden erschien – nach einer grafischen Inspektion der Daten – als passender Wert für den Operator „Gas halten“.

Aus den beschriebenen Überlegungen ergaben sich folgende Operatoren für den rechten Fuß:

„Stark Gas geben“; „Mittel Gas geben“; „Leicht Gas geben“; „Fuß vom Gaspedal zum Bremspedal bewegen“; „Fuß vom Bremspedal zum Gaspedal bewegen“; „Bremspedal treten“; „Fuß abstellen“; „Gas halten“; „Gas verändern“

Die Dauer der Operatoren, die einen direkten Bezug zur Fahrzeugsteuerung haben, konnte jeweils direkt aus den aufgezeichneten Fahrzeugdaten des ViewCars abgeleitet werden. Zur Bestimmung der jeweiligen Dauer der Operatoren „Fuß vom Gaspedal zum Bremspedal bewegen“, „Fuß vom Bremspedal zum Gaspedal bewegen“ und „Fuß abstellen“, mussten die Videodaten betrachtet werden.

Linker Fuß

Die motorischen Bewegungen des linken Fußes beschränken sich auf das Treten der Kupplung beziehungsweise dessen Unterlassen. Daher ließen sich folgende Operatoren ableiten:

„Fuß zur Kupplung bewegen“; „Kupplung treten“; „Fuß auf Kupplung ruhen lassen“; „Fuß von Kupplung wegbewegen“; „Fuß abstellen“

Allerdings trat bei keinem der auszuwertenden Spurwechsel das Ereignis ein, dass die Kupplung getreten wurde, was darauf zurückzuführen ist, dass bei Fahrten auf der Autobahn aufgrund der hohen Geschwindigkeit nur selten der Gang gewechselt wird, es sei denn, das Fahrzeug befindet sich in der Zu- oder Abfahrt der Autobahn.

Um die jeweilige Dauer der beiden übrigen Operatoren „Fuß auf Kupplung ruhen lassen“ und „Fuß abstellen“ zu bestimmen, mussten auch hier lediglich die Videoframes des Fußraumvideos abgezählt werden.

Rechte Hand

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, liegen die Aufgaben der rechten Hand im Lenken des Fahrzeugs und im Betätigen des Schalthebels und

des Scheibenwischers. Da es bei keinem der Spurwechsel zum Gangwechsel kam und auch der Scheibenwischer aufgrund der guten Wetterverhältnisse nicht betätigt werden musste war es nicht notwendig Operatoren für diese motorischen Bewegungen zu erarbeiten.

Für die Auswertung relevante Variablen der vom ViewCar aufgezeichneten fahrzeugbezogenen Daten sind zum einen die Variable „LENKRADWINKEL_SIGN“, die angibt, in welche Richtung das Lenkrad des Fahrzeugs zeigt (0 = nach links; 1 = nach rechts), zum anderen die Variable „LENKRADWINKEL“, die Auskunft über die Winkelstellung des Lenkrads gibt. Dieser letztere Wert schwankt zwischen 0,0 Grad und 1433,6 Grad, sowohl im positiven, als auch im negativen Wertebereich. Da der Lenkradwinkel bei hohen Geschwindigkeiten auf der Autobahn nur minimal von 0 Grad abweicht (Schwankungen liegen zwischen 0 Grad und 10 Grad), wurde festgelegt, dass es sich um eine starke Richtungsänderung handelt, sobald der Lenkradwinkel mehr als 5 Grad annimmt. Beträgt der Lenkradwinkel genau 0 Grad, so wird angenommen, dass der Fahrer geradeaus fährt. Um die Intention der Lenkradbewegung bestimmen zu können – Halten oder Wechseln des Fahrstreifens – wurde sich der Variable „LDW_BVS_QUERABWEI_II16“ bedient, die Auskunft über die Querabweichung des Fahrzeugs zur Fahrstreifenmitte gibt (Einheit in Zentimeter). Für die rechte Hand ergaben sich folgende Operatoren:

„Stark rechts lenken um Spur zu halten“; „Leicht rechts lenken um Spur zu halten“;
„Stark links lenken um Spur zu halten“; „Leicht links lenken um Spur zu halten“;
„Geradeaus lenken um Spur zu halten“; „Stark rechts lenken um Spur zu wechseln“;
„Leicht rechts lenken um Spur zu wechseln“; „Stark links lenken um Spur zu wechseln“;
„Leicht links lenken um Spur zu wechseln“; „Geradeaus lenken um Spur zu wechseln“;
„Hand umsetzen“; „Hand absetzen“; „Hand zum Lenkrad bewegen“

Die jeweilige Dauer der Operatoren, die nicht aus den Daten des ViewCars abgeleitet werden konnte, wurde erneut mithilfe der Videoframes bestimmt.

Linke Hand

Wie oben beschrieben, hat die linke Hand neben ihrer Hauptaufgabe des Lenkens noch weitere Aufgabe zu erfüllen, unter anderem die Betätigung des Blinkers. So geben die Variablen „BLINKER_RECHTS“ und „BLINKER_LINKS“ an, ob der jeweilige Blinker betätigt wurde. Auch hierbei handelt

es sich um nominalskalierte Variablen (0 = Blinker leuchtet nicht; 1 = Blinker leuchtet). Zusätzlich zu den Operatoren, die für die rechte Hand gelten, führt die linke Hand also zwei weitere Operatoren aus:

„Hand zum Blinker bewegen“; „Blinker betätigen“

Auch die jeweilige Dauer dieser beiden Operatoren musste anhand der Videodaten bestimmt werden, da sie einsetzt, bevor der Blinker tatsächlich aufleuchtet und demnach nicht aus den ViewCar-Daten abgeleitet werden konnte. Die benannten Variablen dienen lediglich der Orientierung und geben Aufschluss darüber, wann und wie lange einer der beiden Blinker aufleuchtet. Der mögliche Operator „Hand vom Blinker wegbewegen“ wurde bei der Auswertung nicht miteinbezogen, da er weder der Aufgabenausführung dient, noch eine Handlung vorbereitet.

Augen Augenbewegungen sind notwendig, damit der Autofahrer in seiner Umgebung nach Informationen suchen kann. Aufgrund der kurzen Dauer der Augenbewegungen und der dafür zu geringen Aufzeichnungsrate des Video- und des Eye-Tracking-Systems, wurden nur Operatoren formuliert, die sich auf die Fixationen des visuellen Systems beziehen. Relevante Blickrichtungen beim Autofahren sind hierbei der Blick in Richtung der Windschutzscheibe, in Richtung der Innen- und Außenspiegel, in Richtung des Fahrzeuginnenraums, einschließlich der Bedienelemente des Fahrzeugs, sowie in Richtung der Fahrzeugumgebung. Daraus ergeben sich folgende Operatoren, die durch Betrachtung der Videos erarbeitet wurden:

„Augen in Richtung Windschutzscheibe links halten“; „Augen in Richtung Windschutzscheibe rechts halten“; „Augen in Richtung linker Außenspiegel halten“; „Augen in Richtung rechter Außenspiegel halten“; „Augen in Richtung Rückspiegel halten“; „Augen in Richtung Schulterblick halten“; „Augen in Richtung Tacho halten“; „Augen in Richtung Armaturenbrett halten“; „Augen in Richtung überholendes Auto halten“; „Augen in Richtung überholtes Auto halten“

Die Tatsache, dass die Augenbewegungen nur sehr ungenau und lückenhaft vom Eye-Tracking-System erfasst wurden und zusätzlich stark von den Aufzeichnungen der Videodaten abweichen, führte dazu, dass nur letztere zur Auswertung herangezogen wurden. Da diese Daten allerdings nur mit einer Frequenz von 100 Hertz

aufgezeichnet wurden, was bei einer beschriebenen Sakkadendauer von 30-80 Millisekunden unzureichend ist, können die für die Augenbewegungen angenommenen Zeitspannen teilweise fehlerhaft sein.

Kopf Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, sind die beim Autofahren auftretenden Bewegungen des Kopfes notwendig, um die Augen auf jene Objekte zu richten, deren Wahrnehmung der Informationsaufnahme und der Orientierung des Fahrers dient. Es ließen sich folgende Operatoren nach Betrachtung der Videodaten ableiten, deren Zeitspannen erneut anhand der Videoframes bestimmt werden konnten:

„Kopf in Richtung Windschutzscheibe links halten“; „Kopf von Windschutzscheibe links zum linken Außenspiegel bewegen“; „Kopf von Windschutzscheibe links zum Schulterblick bewegen“; „Kopf von Windschutzscheibe links zum Rückspiegel bewegen“; „Kopf von Windschutzscheibe links zum rechten Außenspiegel bewegen“; „Kopf von Windschutzscheibe links zum Tacho bewegen“; „Kopf in Richtung linker Außenspiegel halten“; „Kopf vom linken Außenspiegel zur Windschutzscheibe links bewegen“; „Kopf vom linken Außenspiegel zum Schulterblick bewegen“; „Kopf vom linken Außenspiegel zum Rückspiegel bewegen“; „Kopf in Richtung rechter Außenspiegel halten“; „Kopf vom rechten Außenspiegel zum Schulterblick bewegen“; „Kopf vom rechten Außenspiegel zur Windschutzscheibe links bewegen“; „Kopf vom rechten Außenspiegel zum Rückspiegel bewegen“; „Kopf in Richtung Rückspiegel halten“; „Kopf vom Rückspiegel zur Windschutzscheibe links bewegen“; „Kopf vom Rückspiegel zum rechten Außenspiegel bewegen“; „Kopf vom Rückspiegel zum linken Außenspiegel bewegen“; „Kopf vom Rückspiegel zum Schulterblick bewegen“; „Kopf in Richtung Schulterblick halten“; „Kopf vom Schulterblick zur Windschutzscheibe links bewegen“; „Kopf vom Schulterblick zum linken Außenspiegel bewegen“; „Kopf vom Schulterblick zum rechten Außenspiegel bewegen“; „Kopf in Richtung Tacho halten“; „Kopf vom Tacho zur Windschutzscheibe links bewegen“

Mithilfe der in diesem Abschnitt beschriebenen Operatoren und deren Auswertungen konnten die motorischen Prozesse der Versuchspersonen während der verschiedenen Spurwechsel erörtert und die jeweilige Dauer bestimmt werden. Wie in Kapitel 3.4 dargestellt, wurde eine Tabelle mithilfe von *Microsoft Excel* erstellt,

deren Zeilenanzahl der Anzahl der Millisekunden der jeweiligen Dauer der verschiedenen Spurwechsel entspricht. Im Kopf jeder Spalte wurden die verschiedenen Körperteile eingetragen, wobei es zwei Spalten für den rechten Fuß gibt. In der einen Spalte wurden die Operatoren eingetragen, die Auskunft darüber geben, wie stark Gas gegeben beziehungsweise ob Gas gegeben oder gebremst wurde, während in der zweiten Spalte abgetragen wurde, ob das Gas verändert oder gehalten wurde. Da nach Betrachtung der Videodaten außerdem festgestellt wurde, dass alle Versuchspersonen den Blinker mit nur zwei Fingern betätigten, während die linke Hand weiterhin das Lenkrad bediente, wurde auch für diese motorische Ressource eine zweite Spalte eingefügt. Allerdings waren die Bewegungen der Finger in den Videos nicht eindeutig erkennbar, was dazu führte, dass die Videoframes nicht abgezählt werden konnten, sondern geschätzt werden mussten.

Neben den Spalten für die einzelnen Körperteile beinhaltet die Tabelle zwei weitere Spalten: „Fahrstreifen“ und „Fahrbahnwechsel“. In der Spalte „Fahrstreifen“ wurde abgetragen, auf welcher Spur sich das Versuchsfahrzeug befand („Beschleunigungsstreifen“; „Rechter Fahrstreifen“; „Linker Fahrstreifen“), während die Spalte „Fahrbahnwechsel“ angibt, ob die Spur gewechselt wurde oder nicht („Wechsel“; „Kein Wechsel“). Wie oben bereits beschrieben, lassen sich diese Informationen anhand der Variable „LDW_BVS_QUERABWEI_II16“ ableiten.

4.1.2 Perzeptuelle Operatoren

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben wurde, beziehen sich die perzeptuellen Prozesse lediglich auf die des visuellen Systems. Diese Prozesse konnten selbstverständlich nicht anhand der Video- oder Fahrzeugdaten abgeleitet werden. Da die Fahraufgabe auf Autobahnen besonders durch situative Merkmale der aktuellen räumlich-zeitlichen Konstellation der Fahrzeugumgebung bestimmt wird, musste ein Weg gefunden werden, die Geschehnisse im Fahrzeug und in dessen Umgebung zu reproduzieren und mithilfe der Augenbewegungen und -fixationen Rückschlüsse auf die perzeptuellen Operatoren ziehen zu können (Fastenmeier & Gstalter, 2003).

Zunächst wurden Operatoren erarbeitet und definiert, die bei Prozessen des visuellen Systems während des Autofahrens angewendet werden können, und es wurde festgelegt, auf welche Objekte sich diese Operatoren beziehen konnten. Bei dem

methodischen Vorgehen zur Erarbeitung der Operatoren wurde sich an der wissenschaftlichen Studie von Richard et al. (2006) orientiert.

Entdecken Umgebungs- und fahrzeugbezogene Reize können entdeckt und dadurch für den Fahrer bekannt werden. Ein Beispiel hierfür wäre ein Fahrzeug, welches das Egofahrzeug² überholt und während des Überholmanövers vom Fahrer entdeckt wird. Hierbei sucht der Fahrer nicht aktiv nach neuen Informationen, sondern entdeckt sie zufällig. Dieser Operator kann also, bezogen auf die beschriebene Thematik, auf die Objekte „Fahrzeug“ und „Schild“ angewendet werden.

Erfassen Durch den Operator „Erfassen“ werden dem Fahrer Objekte ebenfalls bekannt. Im Gegensatz zum Operator „Entdecken“ wird hierbei aktiv nach neuen Informationen gesucht. Die Informationsaufnahme geschieht also nicht zufällig. Dieser Operator wird unter anderem auf das Objekt „Fahrzeug“ angewendet, wenn das erfasste Fahrzeug relevant für den Spurwechsel des Egofahrzeugs ist, beispielsweise beim Erfassen eines Fahrzeugs während eines Schulterblicks. Ein anderes Objekt, auf das der Operator angewendet werden kann, ist das Objekt „Tachometer“. Er setzt also dann ein, wenn der Blick der Versuchsperson in Richtung der Spiegel, des Tachos oder des Schulterblicks geht und das erfasste Objekt für die Ausübung des Spurwechsels relevant ist.

Beobachten Reize, die bekannt sind, können außerdem beobachtet werden. Wirft der Fahrer beispielsweise einen Blick in den Rückspiegel, so dient dies meist dem Beobachten des hinteren Verkehrs oder von bestimmten Ereignissen, die sich hinter dem Egofahrzeug abspielen. Objekte, die zwar für das Fahrverhalten, nicht aber für den Spurwechsel relevant sind und dem Operator „Beobachten“ zugeordnet werden können, sind „Verkehr“ und „Fahrzeug“.

² Als Egofahrzeug wird im Folgenden das von der Versuchsperson gesteuerte Fahrzeug bezeichnet.

Absuchen „Absuchen“ als vierter Operator der perzeptuellen Prozesse dient der aktiven Suche nach Informationen, wenn die Orte der Objekte noch unbekannt sind. Dieser Operator wird beispielsweise dann angewendet, wenn der Fahrer aktiv nach einem Schild sucht, das Auskunft über das momentane Tempolimit gibt. Da keine der Versuchspersonen während der Spurwechsel aktiv nach Schildern gesucht hat, wurde bei der Auswertung von diesem Operator kein Gebrauch gemacht.

Um herauszufinden, warum ein Objekt Einfluss auf das Fahrverhalten der Versuchspersonen haben könnte, müssen auch die Attribute der einzelnen Objekte bestimmt werden. Für das Fahrverhalten relevante Attribute anderer Fahrzeuge sind hauptsächlich der Fahrzeugtyp (PKW, LKW, Motorrad) und die Geschwindigkeit (schneller, gleich, langsamer als das Egofahrzeug). Aber auch das Wissen darüber, ob ein anderes Fahrzeug bremst (Blinklichter leuchten auf), blinkt (Blinklichter leuchten auf) oder den Fahrstreifen wechselt, kann das Fahrverhalten beeinflussen.

Damit die Operatoren auf die Abläufe der verschiedenen Spurwechsel angewendet werden konnten, mussten die Umgebungsereignisse, unter Berücksichtigung der temporären Blickfelder der Versuchspersonen, rekonstruiert werden. Hierfür wurde eine Umgebungsmatrix erstellt. Folgende Abbildung visualisiert diese Matrix.

Linker Fahrstreifen _{WV}	Rechter Fahrstreifen _{WV}	Beschleunigungsstreifen _{WV}	Mit WV = weit vorne NV = nah vorne N = neben NH = nah hinten WH = weit hinten
Linker Fahrstreifen _{NV}	Rechter Fahrstreifen _{NV}	Beschleunigungsstreifen _{NV}	
Linker Fahrstreifen _N	Rechter Fahrstreifen _N	Beschleunigungsstreifen _N	
Linker Fahrstreifen _{NH}	Rechter Fahrstreifen _{NH}	Beschleunigungsstreifen _{NH}	
Linker Fahrstreifen _{WH}	Rechter Fahrstreifen _{WH}	Beschleunigungsstreifen _{WH}	

Abbildung 8. Die Umgebungsmatrix.

Die Umgebungsmatrix besteht aus fünf Zeilen und drei Spalten. Die Zeilen geben hierbei die Entfernung der Objekte, bezogen auf das Egofahrzeug, an, während die Spalten die verschiedenen Fahrstreifen repräsentieren. Die dritte Spalte „Beschleunigungsstreifen“ ist nur für den jeweils ersten Spurwechsel Bestandteil der Matrix. Bei den beiden anderen Spurwechseln fällt diese Spalte weg.

Das Egofahrzeug „E“ wird immer einem der Elemente der Zeile „neben“ zugeordnet, je nachdem, auf welchem Fahrstreifen es sich momentan befindet. Wechselt das Egofahrzeug den Fahrstreifen, so wird es dem Element des Zielfahrstreifens zugeordnet, sobald sich die Querabweichung des Fahrzeugs auf die Mitte des Zielfahrstreifens bezieht. Die Variable „LDW_BVS_QUERABWEI_II16“ der vom ViewCar aufgezeichneten Fahrzeugdaten gibt Aufschluss darüber.

Objekte gehören der Zeile „weit vorne“ an, wenn ihre Entfernung zum Egofahrzeug mehr als 50 m beträgt. Befinden sich Objekte zwischen fünf und 50 m vor dem Egofahrzeug, so werden sie der Zeile „nah vorne“ zugeordnet. Die Variable „TO_DX“ gibt die Distanz zum Zielobjekt des Egofahrzeugs an. Dieser Wert bezieht sich allerdings nur auf Objekte, die sich auf demselben Fahrstreifen befinden, wie das Egofahrzeug. Fahren Fahrzeuge auf einem der Nachbarfahrstreifen, so müssen ihre Entfernungen zum Egofahrzeug anhand der auf den Videodaten erkennbaren Fahrbahnmarkierungen abgeschätzt werden. Auch ihr Wechsel auf einen anderen Fahrstreifen muss subjektiv bestimmt werden, wenn sie sich nicht auf dem Egofahrstreifen befinden oder auf diesen wechseln.

Fahren Objekte auf dem Nachbarfahrstreifen bis zu fünf Meter vor beziehungsweise hinter dem Egofahrzeug, so werden sie in die Zeile „neben“ eingetragen. Fahrzeuge befinden sich in diesem Abschnitt, wenn sie weder in der Kamera mit Sicht nach vorne, noch in der Kamera mit Sicht nach hinten zu sehen sind (vgl. Abbildung 2 Seite 25).

Konform zu den Distanzen der Objekte vor dem Egofahrzeug, werden jene Objekte, die sich hinter dem Egofahrzeug befinden, bei einer Entfernung von bis zu 50 m in die Zeile „nah hinten“ und bei einer Entfernung von mehr als 50 m in die Zeile „weit hinten“ eingetragen. Auch hier muss die Entfernung anhand der Videodaten geschätzt werden.

Pro Millisekunde werden der Operator, das Objekt und die Elemente der Umgebungsmatrix neu bestimmt. Hierbei werden die Attribute der Objekte „Fahrzeug“ und „Verkehr“ in die Matrixkomponenten eingetragen (das Objekt „Tacho“ weist keine Attribute auf). Wie bereits erwähnt, können nicht alle Operatoren mit allen Objekten kombiniert werden. Unter Anwendung des Objekts „Fahrzeug“ dürfen nur Attribute eines Fahrzeugs in die Umgebungsmatrix eingetragen werden, während es mehrere sein müssen, sobald das Objekt „Verkehr“ gewählt wurde.

Ferner werden nur die Elemente der Matrix bestimmt, die im Blickfeld der Versuchsperson liegen. Schaut der Proband beispielsweise durch die Windschutzscheibe (Kamera mit Sicht nach vorne), während er sich auf dem rechten Fahrstreifen befindet, so dürfen nur die Elemente „Linker Fahrstreifen_{WV}“, „Linker Fahrstreifen_{NV}“, „Rechter Fahrstreifen_{WV}“ und „Rechter Fahrstreifen_{NV}“ festgelegt werden, für die übrigen Komponenten wird eine „0“ eingetragen. Wenn der Blick der Versuchsperson in Richtung Schulterblick fällt, so werden nur die Elemente der Zeile „neben“ bestimmt. Bei einem Blick in den linken oder rechten Außenspiegel, werden nur die Komponenten des hinteren linken beziehungsweise des hinteren rechten Fahrstreifens bestimmt (Kamera nach hinten links und Kamera nach hinten rechts) (vgl. Abbildung 2 Seite 25). Befände sich das Egofahrzeug in einer Kurve, was bei dem ausgewählten Spurwechsel nicht der Fall ist, so würde auch das Element „weit hinten“ des Egofahrstreifens bestimmt werden.

Die beschriebenen Attribute Typ, Geschwindigkeit, Bremslicht, Blinker und Spurwechsel können durch Betrachtung der Videodaten erörtert werden. Zusätzlich kann zur Bestimmung des Attributs Geschwindigkeit erneut die Variable „TO_DX“ zur Hilfe genommen werden, sofern sich das Fahrzeug auf derselben Spur befindet, wie das Egofahrzeug. Da die gleichen Attribute meist über mehrere Millisekunden hinweg bestehen bleiben, kann die Betrachtung der Veränderungsdistanz zum vorderen Fahrzeug Aufschluss über dessen Geschwindigkeit geben.

Befinden sich mehrere Fahrzeuge in einem der Straßenabschnitte, so werden jene Attribute zuerst genannt, die dem Fahrzeug angehören, das die kleinste Distanz zum Egofahrzeug aufweist.

Mithilfe der in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweise konnten die perzeptuellen Operatoren und deren Dauern bei den verschiedenen Spurwechseln

der Versuchspersonen bestimmt werden. Die vollständige Umgebungsmatrix wurde dabei an die im vorherigen Kapitel beschriebene Tabelle der motorischen Operatoren angehängt. Jede Komponente der Matrix entspricht also einer weiteren Spalte in der Auswertungstabelle. Somit wurden die Matrixkomponenten pro Millisekunde neu bestimmt, wobei die Zeitspannen der Operatoren denen der Augenfixationen entsprechen, sofern sich die Attribute der Objekte in dieser Zeit nicht verändern.

Da es nicht dem Ziel dieser Arbeit entspricht, die CPM-GOMS-Analyse vollständig durchzuführen, sondern die Eignung dieser Methode zu beurteilen, wurden die kognitiven Operatoren nicht vollständig aufgestellt. In Kapitel 4.3 wird jedoch auf Möglichkeiten eingegangen, wie die kognitiven Operatoren konstruiert werden könnten und welche Schritte notwendig wären, um eine adäquate Auswertung durchführen zu können.

4.2 Ergebnisse

Um die weiteren Ziele dieser Arbeit zu erreichen und die Forschungsfrage beantworten zu können, wurden die Eigenschaften der motorischen und perzeptuellen Operatoren deskriptiv ausgewertet und miteinander verglichen. Hierbei wurden sowohl die Eigenschaften aller Spurwechseltypen und Versuchspersonen betrachtet, als auch die Eigenschaften pro Versuchsperson, pro Spurwechseltyp und pro Versuchsperson und Spurwechseltyp. Bei der Analyse der Eigenschaften zwischen den Versuchspersonen ergaben sich keine Auffälligkeiten, sodass diese nicht mit aufgeführt werden. Im Folgenden wird für jede Ressource auf die relevantesten Operatoren sowie die Gemeinsamkeiten und Unterschiede ihrer Eigenschaften eingegangen. Ergänzend werden verschiedene Häufigkeitsverteilungen zur Visualisierung der Operatoreigenschaften aufgeführt.

Im Rahmen der deskriptiven Analyse wurden die Daten von neun verschiedenen Spurwechselmanövern ausgewertet. Hierbei belief sich die minimale Dauer auf 11.000 Millisekunden ($n = 4$) und die maximale Dauer auf 13.000 Millisekunden ($n = 2$). Im Durchschnitt betrug die Zeitspanne eines Spurwechselmanövers 11.778 Millisekunden ($SD = 833$). Bei Betrachtung der Zeitspannen der verschiedenen Spurwechseltypen, wurde eine Durchschnittszeitspanne von $MW = 12.667$ Millisekunden für den Spurwechseltyp vom Beschleunigungstreifen auf den rechten

Fahrstreifen ermittelt. Die Zeitspannen der anderen beiden Spurwechseltypen fielen mit $MW = 11.667$ Millisekunden ($SD = 577$) für das Manöver vom rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen und $MW = 11.000$ Millisekunden ($SD = 0$) für das Manöver vom linken Fahrstreifen auf den rechten geringer aus. Ergänzend wurden die deskriptiven Werte der einzelnen Phasen der Spurwechselmanöver analysiert. So beträgt die durchschnittliche Dauer der Phase, vor dem eigentlichen Spurwechsel 4.539 Millisekunden ($SD = 369$) und nach dem eigentlichen Spurwechsel 3.503 Millisekunden ($SD = 333$). Dies lässt sich auf die in Kapitel 4.1 beschriebene Formel zurückführen, welche angibt, dass die Phase vor dem eigentlichen Spurwechsel mindestens vier Sekunden und nach dem Spurwechsel mindestens drei Sekunden beträgt. Die Dauer des eigentlichen Spurwechsels fällt je nach Lenkstärke unterschiedlich aus und schwankt somit zwischen 2.990 Millisekunden und 4.790 Millisekunden ($MW = 3493$; $SD = 611$).

4.2.1 Rechter und linker Fuß

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, sind die beiden Füße für die Geschwindigkeitsregulierung zuständig. Bei Betrachtung der deskriptiven Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Operatoren, welche für die Abbremsung des Fahrzeugs notwendig sind, nur selten zum Einsatz kamen. Insgesamt setzte der Operator „Bremspedal treten“ während aller neun Spurwechselmanöver nur einmal ein. Der Operator „Auf Gaspedal ruhen lassen“, welcher mit der Aktivierung der Motorbremse gleichgesetzt werden kann, trat mit $n = 4$ ebenfalls nur selten auf. Die anderen Operatoren, die der Geschwindigkeitsregulierung dienen, kamen wesentlich häufiger zum Einsatz. Auffällig ist besonders, dass die Operatoren „Mittel Gas geben“ und „Stark Gas geben“ mit $n = 32$ und $n = 24$ etwa dreimal beziehungsweise doppelt so oft auftraten wie „Leicht Gas geben“ ($n = 13$). Hierbei hat „Stark Gas geben“ mit einem Mittelwert von 2.835 Millisekunden ($SD = 4.074$) die längste durchschnittliche Dauer (vgl. $MW_{\text{Leicht Gas geben}} = 699$ Millisekunden ($SD = 678$), $MW_{\text{Mittel Gas geben}} = 752$ Millisekunden ($SD = 819$)). Betrachtet man diese Operatoren für die verschiedenen Spurwechseltypen, um mögliche Gemeinsamkeiten oder Unterschiede zu erörtern, so sind ähnliche Häufigkeiten und Zeitspannen erkennbar. Allerdings fallen die Eigenschaften jenes Spurwechseltyps anders aus, bei dem das Manöver von dem linken Fahrstreifen auf den rechten Fahrstreifen vollzogen wird. Zwar kommen die

Operatoren „Mittel Gas geben“ und „Stark Gas geben“ auch hier am häufigsten vor, allerdings hat der Operator „Leicht Gas geben“ mit $MW = 2.000$ Millisekunden ($SD = 424$) durchschnittlich die längste Dauer, während er bei den anderen beiden Spurwechseltypen nur etwa ein Siebtel der Durchschnittsdauer des Operators „Stark Gas geben“ ausmacht. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass dieser Spurwechseltyp normalerweise nicht aufgrund eines Überholvorgangs ausgeführt wird und die Geschwindigkeit somit nicht erhöht werden muss.

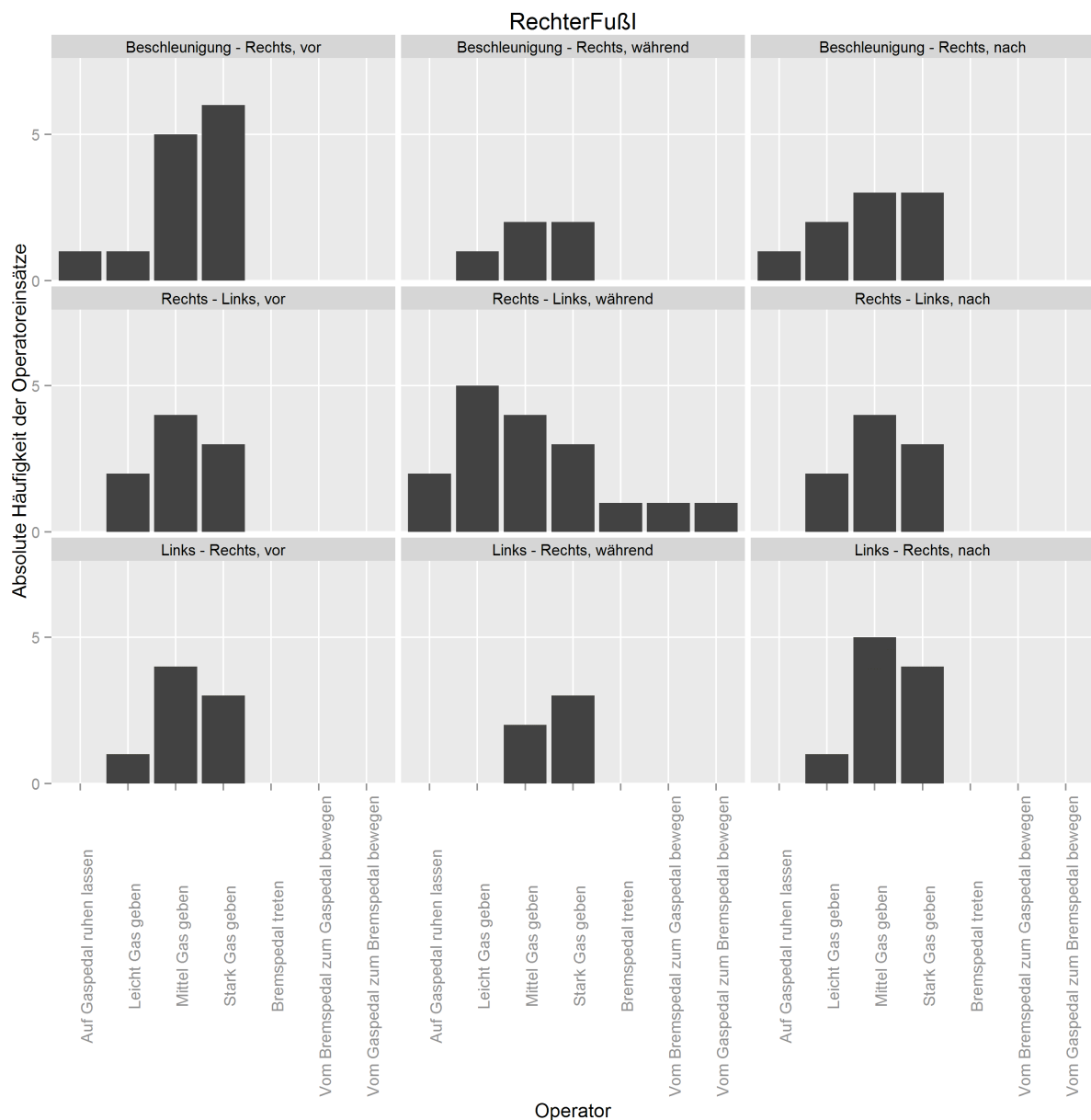


Abbildung 9. Die absoluten Häufigkeiten der Operatoren des rechten Fußes pro Spurwechseltyp und Phase.

Die Abbildungen 9 und 10 visualisieren die beschriebenen Operatoreigenschaften des rechten Fußes. In Abbildung 9 sind die Operatoren auf der x-Achse abgetragen, während die y-Achse die absoluten Häufigkeiten der Operatoreinsätze widerspiegelt. Demgegenüber steht Abbildung 10 mit den verschiedenen Operatoren auf der x-Achse und deren jeweiliger Gesamtdauer in Millisekunden auf der y-Achse. Zu sehen sind die Häufigkeitsverteilungen pro Spurwechseltyp und Phase.

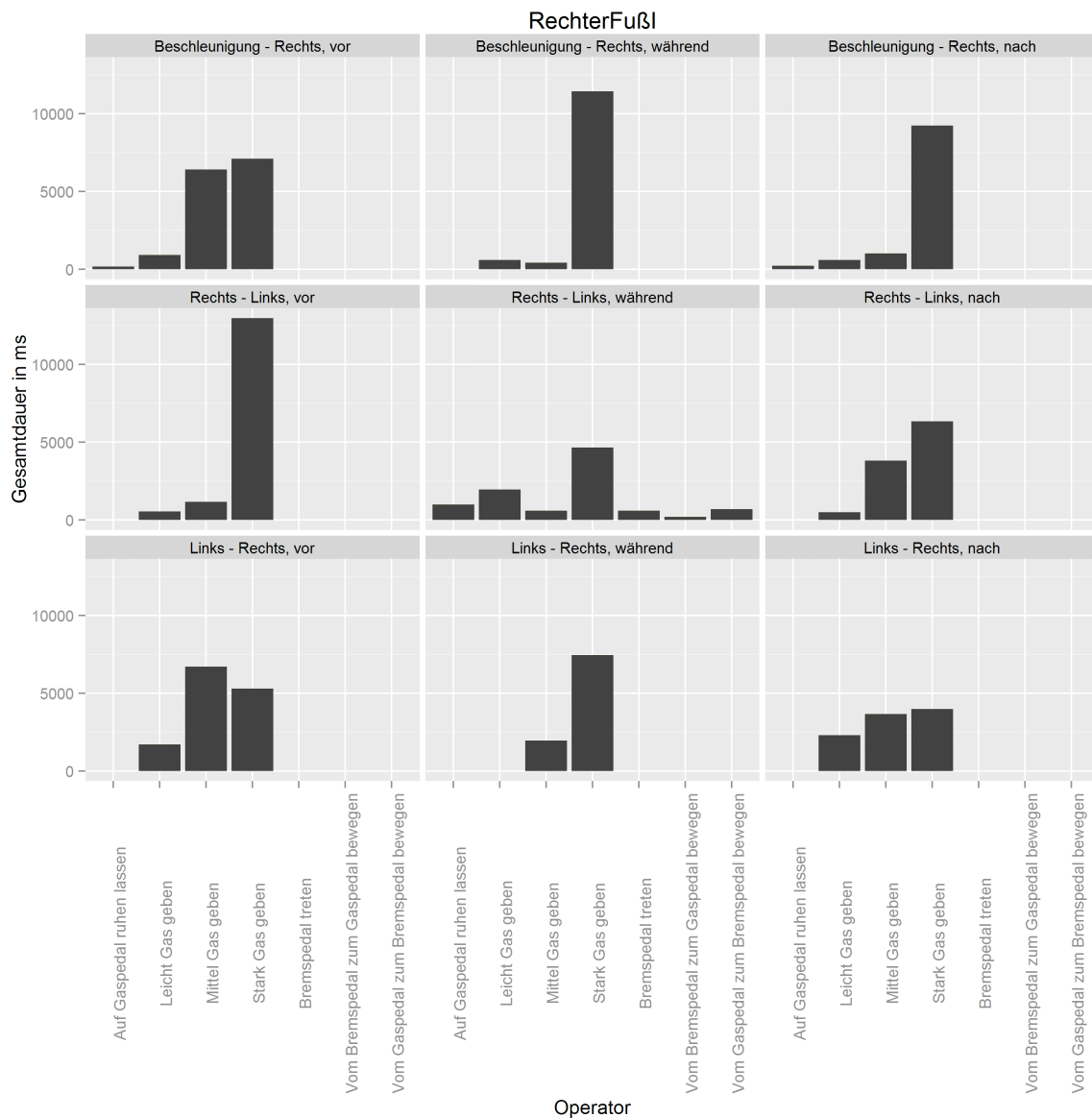


Abbildung 10. Die Häufigkeitsverteilung der Operatordauern des rechten Fußes pro Spurwechseltyp und Phase.

Da es ebenfalls Ziel ist, bestimmte Zeitspannen für die einzelnen Operatoren festzulegen, wurden neben den Mittelwerten auch die Standardabweichungen der Operatorzeitspannen betrachtet. Hierbei war auffällig, dass die

Standardabweichungen alle sehr groß ausfallen, was bedeutet, dass die Zeitspannen der verschiedenen Operatoren stark variieren. Dies ist allerdings nicht verwunderlich, da es sich hierbei nicht um Reaktionszeiten mit festen Zeitspannen handelt, sondern um Zeitspannen, die je nach Ziel des Spurwechselmanövers, der aktuellen Geschwindigkeit und der Geschwindigkeiten der Nachbarfahrzeuge stark schwanken können. Betrachtet man die Operatoren „Gas halten“ und „Gas verändern“ so ist zu erkennen, dass der Operator „Gas verändern“ mit $n = 81$ ähnlich oft wie der Operator „Gas halten“ mit $n = 76$ auftritt. Auch bei den verschiedenen Spurwechseltypen weisen die beiden Operatoren ähnliche Häufigkeiten auf.

4.2.2 Rechte und linke Hand

Bei Betrachtung der deskriptiven Werte der Operatoren für die beiden Hände, sind vor allem jene bedeutend, welche für die Lenkung des Fahrzeugs eingesetzt wurden. Hierbei weisen die Operatoren „Geradeaus lenken um Spur zu halten“ ($n = 30$), „Leicht links lenken um Spur zu halten“ ($n = 22$) und „Leicht rechts lenken um Spur zu halten“ ($n = 19$) die größten absoluten Häufigkeiten auf. Dies kann dadurch begründet werden, dass der eigentliche Spurwechsel, wie oben beschrieben, durchschnittlich nur etwa ein Drittel der Gesamtdauer des Spurwechsels ausmacht und somit primär solche Operatoren eingesetzt werden, durch welche das Fahrzeug auf dem Fahrstreifen gehalten wird. Die Operatoren des leicht seitwärts beziehungsweise des geradeaus Lenkens für einen Fahrstreifenwechsel, bilden die nächst häufigsten Operatoren. Sie bewegen sich zwischen $n = 11$ („Leicht links lenken um Spur zu wechseln“), $n = 12$ („Geradeaus lenken um Spur zu wechseln“) und $n = 16$ („Leicht rechts lenken um Spur zu wechseln“). Starke Lenkbewegungen werden weder oft zum Wechseln eines Fahrstreifens noch zum Halten eines Fahrstreifens eingesetzt. Die absoluten Häufigkeiten dieser Operatoren bewegen sich zwischen vier- und sechsmaligem Einsatz. Vergleicht man die Eigenschaften der Operatoren zwischen den verschiedenen Spurwechseltypen, so sind die Verhältnisse der absoluten Häufigkeiten vergleichbar. Nur die starken Lenkbewegungen weisen Unterschiede auf. So treten diese gehäuft bei dem Spurwechsel vom Beschleunigungsstreifen auf den rechten Fahrstreifen auf. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass die Zeit für diesen Spurwechseltyp durch die endliche Länge des Beschleunigungsstreifens begrenzt ist, was zur Folge hat, dass der Lenkwinkel erhöht

werden muss, um das Manöver in der gegebenen Zeit ausführen zu können. Betrachtet man die durchschnittlichen Zeitspannen der Lenkoperatoren, so weisen sie alle unterschiedliche Längen und hohe Standardabweichungen auf, was auch bei diesen Operatoren darauf zurückzuführen ist, dass es sich nicht um Reaktionszeiten handelt und die Zeitspannen je nach Fahrbahngegebenheiten, nach Art des Spurwechselmanövers und nach aktueller Geschwindigkeit des Egofahrzeugs variieren können. Folgende Abbildung visualisiert die absoluten Häufigkeiten der Lenkoperatoren pro Spurwechseltyp.

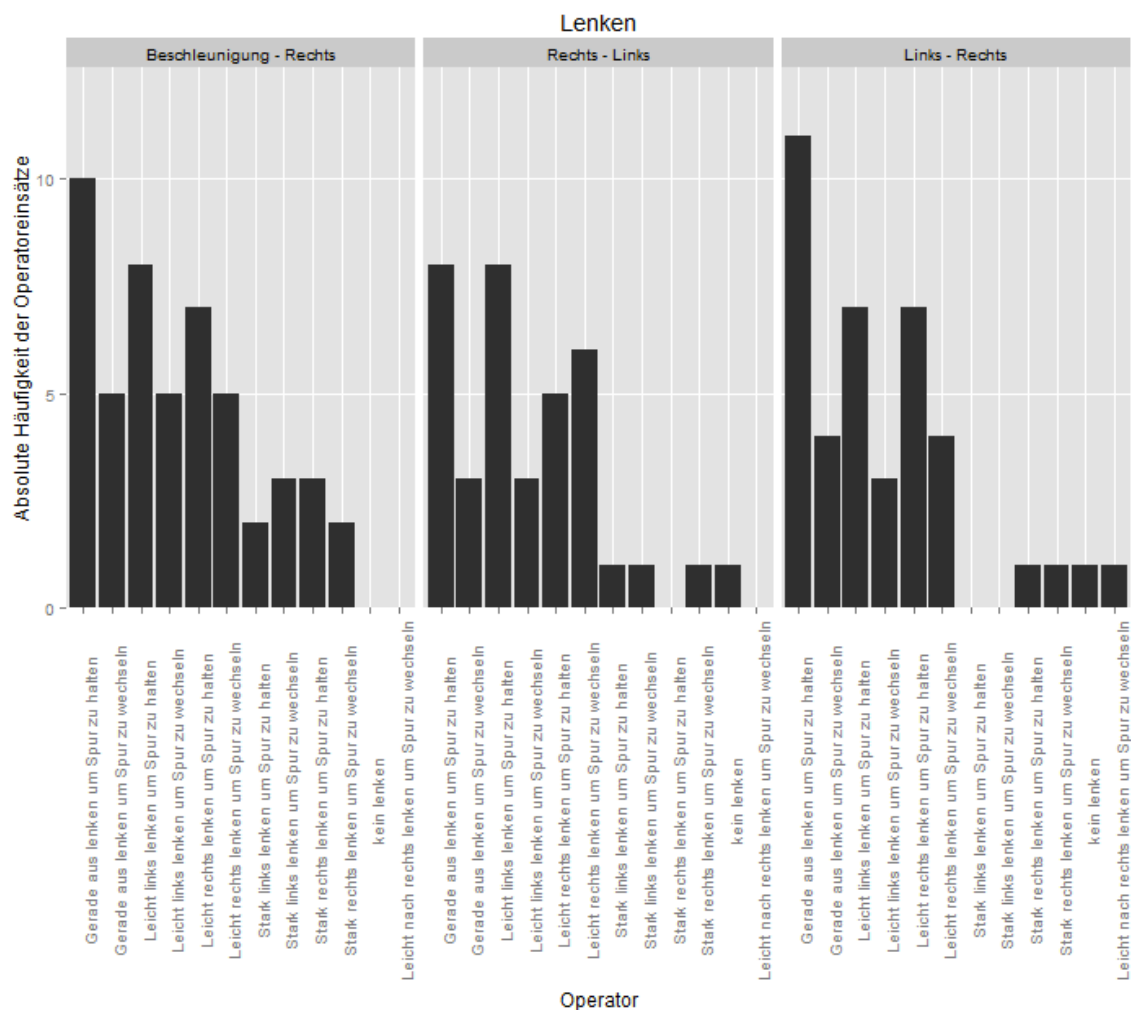


Abbildung 11. Die Häufigkeitsverteilungen der Lenkoperatoren pro Spurwechseltyp.

4.2.3 Augen und Kopf

Bei den Operatoren der Augen, welche den Blickrichtungen des visuellen Systems entsprechen, ist der Operator „Augen in Richtung Windschutzscheibe links halten“

mit $n = 43$, nicht nur der am häufigsten auftretende Operator, sondern weist mit $MW = 1.719$ Millisekunden ($SD = 1434$) ebenfalls die größte durchschnittliche Zeitspanne auf. Diese Eigenschaften sind keineswegs verwunderlich, da schon in früheren Forschungsarbeiten zum Blickverhalten von Kraftfahrern herausgefunden wurde, dass etwa 90% der Fixationen in Richtung des Focus of Expansion liegen, ein entfernter Punkt, auf den man sich während der Fahrt zubewegt (Rockwell, 1972). Die am nächst häufigsten auftretenden Operatoren sind „Augen in Richtung linker Außenspiegel halten“ ($n = 20$) und „Augen in Richtung Rückspiegel halten“ ($n = 11$). Hierbei liegen die durchschnittlichen Zeitspannen bei 586 und 535 Millisekunden. Auch ihre Standardabweichungen sind verhältnismäßig gering ($SD_{\text{Linker Außenspiegel}} = 297$; $SD_{\text{Rückspiegel}} = 199$), was damit begründet werden kann, dass die Zeit dieser Informationssuche aufgrund des steigenden Risikos durch Blickabwendungen von der Straße beschränkt ist (Diem, 2005). Der Schulterblick tritt während der neun Spurwechsel zehn Mal auf und dauert mit $MW = 540$ Millisekunden ($SD = 168$) ähnlich lange wie die Blicke in die Spiegel, wobei die maximale Dauer bei 720 Millisekunden und die minimale Dauer bei 160 Millisekunden liegt.

Betrachtet man die jeweilige Gesamtdauer der Operatoren bei den verschiedenen Spurwechseltypen (vgl. Abbildung 12), so ist erkennbar, dass der Operator „Augen in Richtung Linker Außenspiegel halten“ bei dem Spurwechsel vom Beschleunigungstreifen auf den rechten Fahrstreifen in allen Phasen wesentlich länger auftritt als bei dem Spurwechsel vom rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen. Dies könnte mit der begrenzten Zeit, die dem Fahrer für den Spurwechsel zur Verfügung steht, begründet werden. Die Häufigkeit des Auftretens des Operators „Augen in Richtung Rückspiegel halten“ variiert bei allen Spurwechseltypen. So kommt er bei dem Spurwechseltyp vom Beschleunigungstreifen auf den rechten Fahrstreifen gar nicht vor, während er bei dem Spurwechsel vom rechten auf den linken Fahrstreifen drei mal und bei dem Spurwechsel vom linken Fahrstreifen auf den rechten Fahrstreifen acht mal auftritt. Abbildung 12 veranschaulicht außerdem, dass der Rückspiegel hauptsächlich bei letzterem Spurwechseltyp genutzt wird. Vor allem in der ersten Phase dauert sein Einsatz ähnlich lange wie der des rechten Außenspiegels. Auch während und nach dem Wechsel dient der Rückspiegel der Informationsaufnahme, wofür er bei den anderen beiden Spurwechseltypen kaum genutzt wurde.

Dies lässt sich möglicherweise dahingehend interpretieren, dass die Außenspiegel primär genutzt werden, wenn schnellerer Verkehr auf dem Zielfahrstreifen von hinten anfahren kann, während der Rückspiegel zur Beobachtung des Verkehrs herangezogen wird, wenn der Fahrer die Absicht hat, auf einen Fahrstreifen zu wechseln, auf dem die herrschende Geschwindigkeit kleiner oder ähnlich wie die des Egofahrzeugs ist und der Verkehr dadurch nicht dauerhaft beobachtet werden muss.

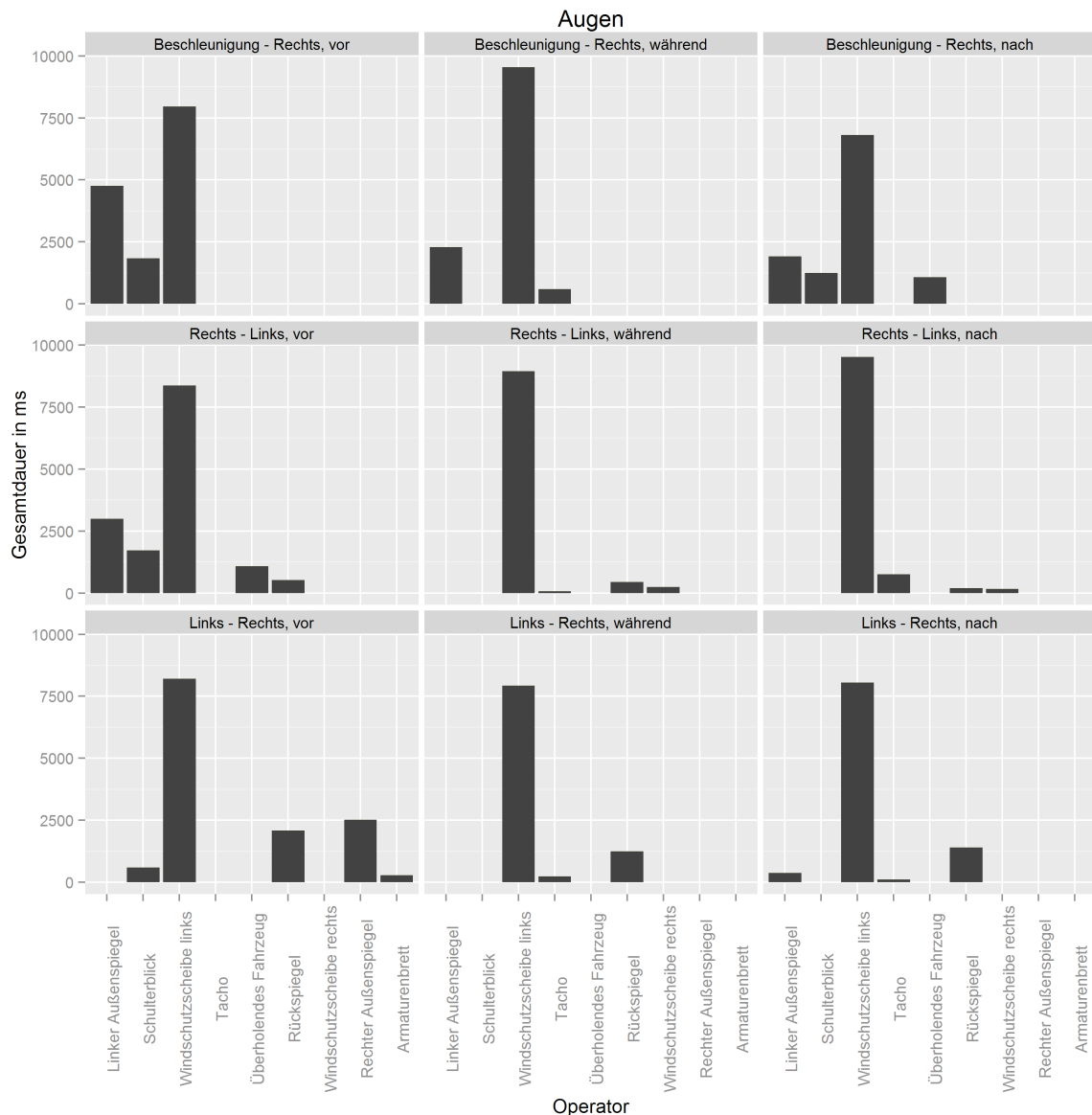


Abbildung 12. Die Häufigkeitsverteilungen der Operatordauern der Augen pro Spurwechseltyp und Phase.

Die Häufigkeitsverhältnisse der Operatoren des Kopfes, die den Blickrichtungen entsprechen, sind konform zu denen der Augen. Da die Ressource „Kopf“ allerdings auch jene Operatoren beinhaltet, welche die Bewegungen von einem Fixationspunkt

zu einem anderen beschreibt, sind die durchschnittlichen Zeitspannen der Operatoren mit Kopfhaltung in Richtung der Fixationspunkte etwa 100 bis 150 Millisekunden kürzer als die der Augen. Die am häufigsten auftretenden Kopfbewegungen stellen die Operatoren „Kopf von Windschutzscheibe links zum linken Außenspiegel bewegen“ mit $n = 16$ und einer durchschnittlichen Dauer von $MW = 250$ Millisekunden ($SD = 75$) und „Kopf vom linken Außenspiegel zur Windschutzscheibe links bewegen“ mit $n = 12$ und $MW = 311$ Millisekunden ($SD = 140$) dar. Dass letzterer Operator seltener auftritt, ist damit zu begründen, dass sich der Kopf vom linken Außenspiegel gelegentlich auch zum Schulterblick oder zu anderen Blickrichtungen bewegt. Insgesamt treten die verschiedenen Kopfbewegungen aufgrund der Menge an Richtungsmöglichkeiten und der kleinen Stichprobe zu selten auf, um repräsentative Dauern der Operatoren festlegen zu können.

4.2.4 Visuelles System

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden neben den motorischen Operatoreigenschaften auch die des visuellen Systems deskriptiv ausgewertet. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu überschreiten, wurde sich hierbei lediglich auf die perzeptuellen Operatoren bezogen; die Objekte wurden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Operatoren „Beobachten“ mit $n = 38$ und „Erfassen“ mit $n = 36$ während der neun Spurwechsel etwa gleich häufig auftraten. Allerdings unterscheiden sich ihre durchschnittlichen Zeitspannen stark (vgl. Abbildung 13). Der Mittelwert des Operators „Beobachten“ liegt bei $MW = 2145$ Millisekunden ($SD = 2359$), während „Erfassen“ einen Mittelwert von $MW = 605$ Millisekunden ($SD = 300$) aufweist. Diese unterschiedlichen Zeitspannen können dadurch erklärt werden, dass der Operator „Erfassen“ dann einsetzt, wenn aktiv nach neuen Informationen gesucht wird, was bedeutet, dass der Blick in Richtung der Spiegel, des Tachos oder des Schulterblicks geht (vgl. Kapitel 4.1.2). Wie oben bereits erwähnt, sind diese Zeitspannen begrenzt, was dazu führt, dass auch die Zeitspannen des Operators „Erfassen“ kürzer ausfallen, als die des Operators „Beobachten“. Betrachtet man die Verhältnisse der absoluten Häufigkeiten der beiden Operatoren für die verschiedenen Spurwechseltypen, so sind keine großen Unterschiede erkennbar; sie werden beide etwa gleich häufig eingesetzt.

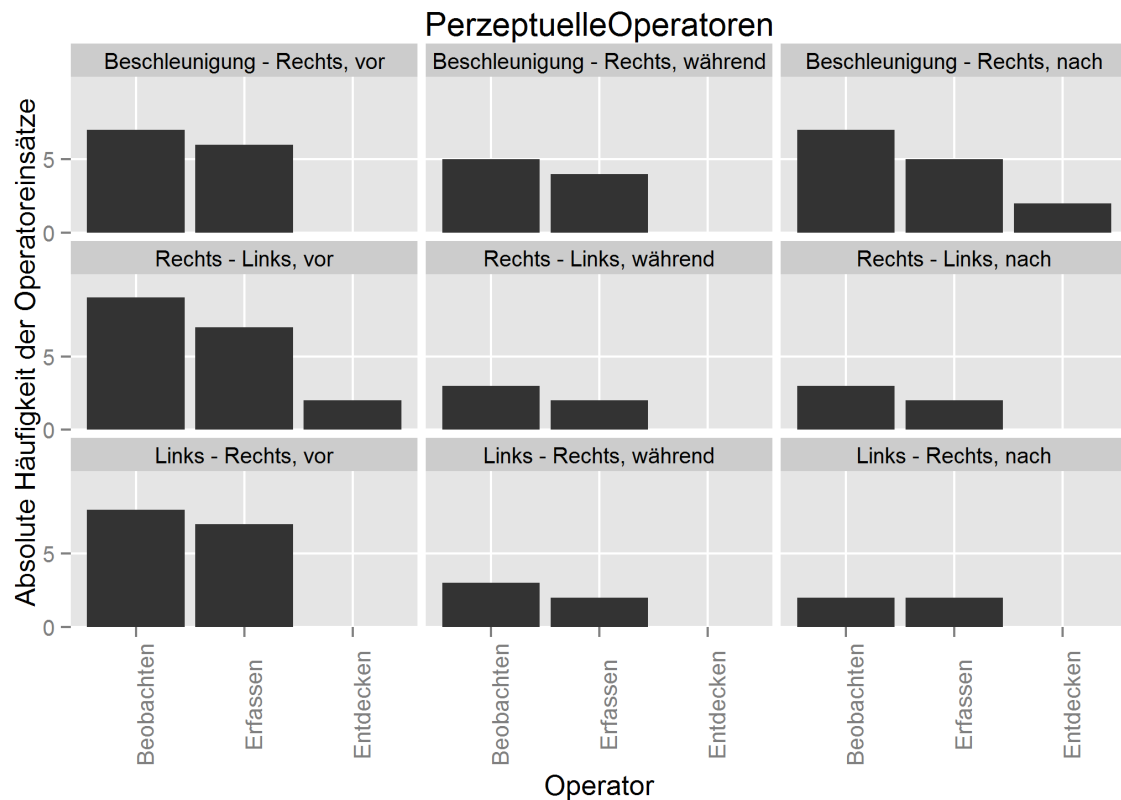


Abbildung 13. Die absoluten Häufigkeiten der Operatoren des visuellen Systems pro Spurwechseltyp und Phase.

Der Operator „Entdecken“ setzt während der neun Spurwechsel insgesamt nur vier Mal ein; jeweils zweimal bei dem Spurwechseltyp vom Beschleunigungstreifen auf den rechten Fahrstreifen und bei dem Spurwechseltyp vom rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen. Die Abbildungen visualisieren, dass ein Fahrzeug immer dann entdeckt wurde, wenn sich das Egofahrzeug auf dem rechten Fahrstreifen befand. So setzt der Operator in der ersten Phase des Spurwechsels vom rechten auf den linken Fahrstreifen ein und in der letzten Phase des Spurwechsels vom linken Fahrstreifen auf den rechten.

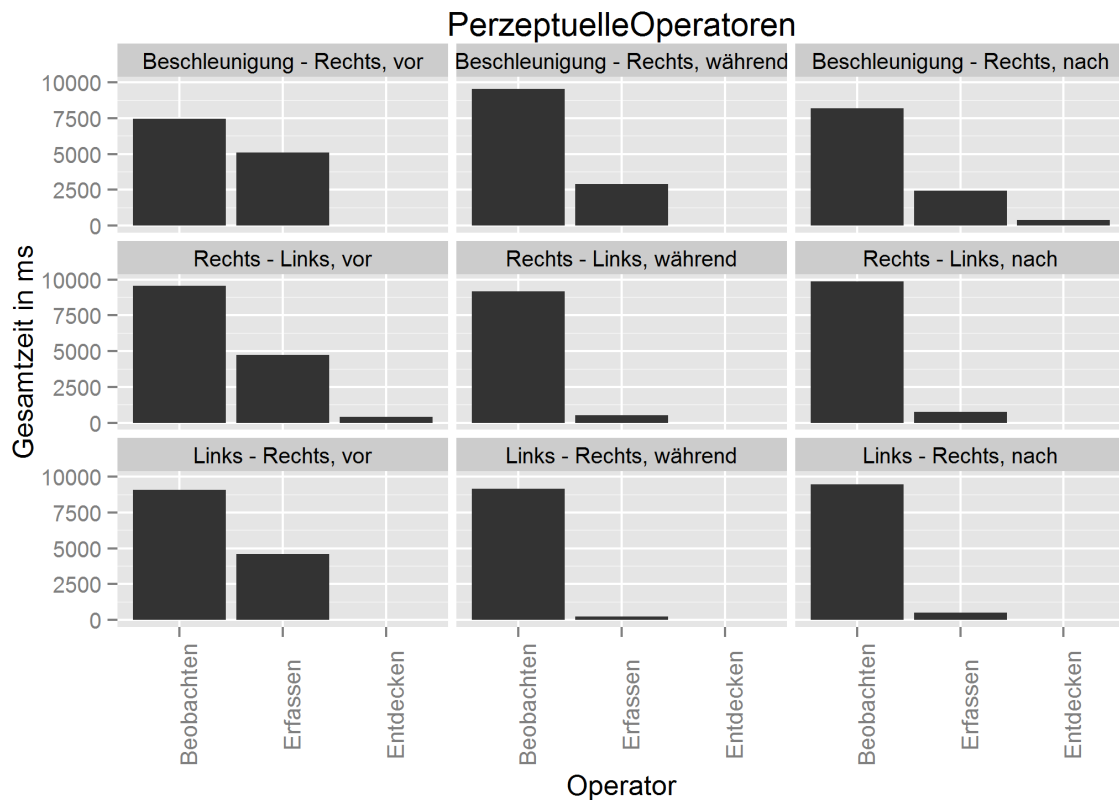


Abbildung 14. Die Häufigkeitsverteilungen der Operatordauern des visuellen Systems pro Spurwechseltyp und Phase.

Zur Veranschaulichung, wie die parallelen Prozesse eines Spurwechselmanövers grafisch dargestellt werden können, wurde nachstehende Abbildung exemplarisch erstellt. Zu erkennen sind die relevantesten Operatoren der verschiedenen Ressourcen auf der y-Achse und deren Zeitanteile während des Spurwechselmanövers auf der x-Achse. Diese Abbildung spiegelt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 1 während des Spurwechselmanövers vom Beschleunigungstreifen auf den rechten Fahrstreifen wider. Im Anhang E befinden sich weitere Abbildungen der zeitlichen Operatorverläufe für die verschiedenen Versuchspersonen und Spurwechseltypen.

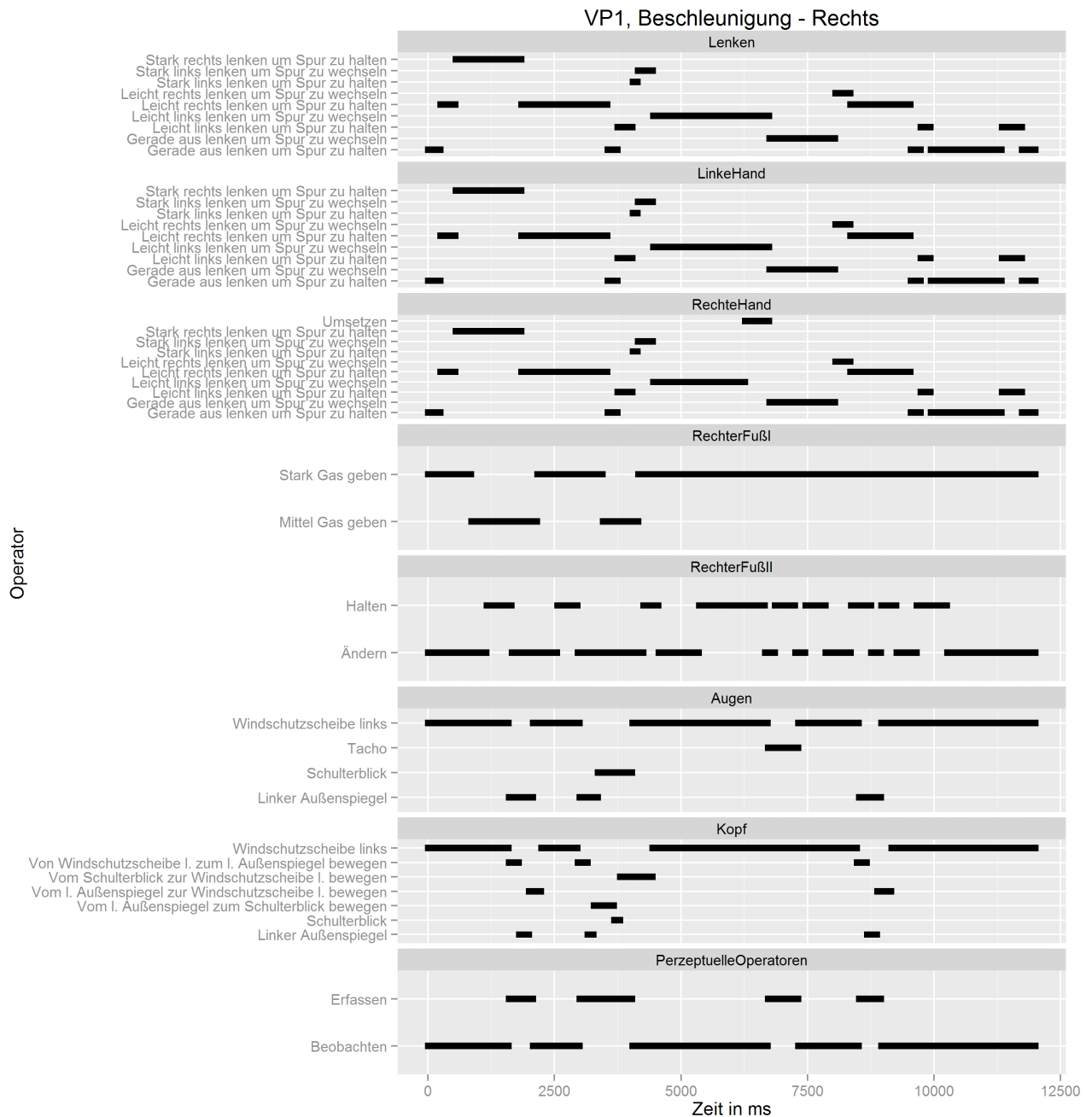


Abbildung 15. Der zeitliche Operatorverlauf der Versuchsperson 1 während des ersten Spurwechselmanövers.

4.3 Grundlagen für die Aufstellung kognitiver Operatoren

Die kognitiven Prozesse eines jeden Menschen sind sehr komplex und für Außenstehende nur schwer nachzuvollziehen und zu erörtern. Da eine vollständige Auswertung über die Anforderungen dieser Arbeit hinausgehen würde, und die in Kapitel 2.5 beschriebene Forschungsfrage sich nicht mit der gesamten Durchführung, sondern mit der Anwendbarkeit der CPM-GOMS-Methode beschäftigt, wurde sich auf

die Erarbeitung der beschriebenen kognitiven Methoden beschränkt. Zusätzlich wird ein Ausblick darauf gegeben, wie ein Teil der kognitiven Operatoren aussehen könnte, und es wird kurz angerissen, wie zukünftig fortgefahren werden müsste, um eine Auswertung der kognitiven Operatoren durchführen zu können.

Um die für die Spurwechseldaten relevanten Methoden zu erarbeiten, wurden die Videodaten und die Auswertung der motorischen und perzeptuellen Operatoren betrachtet, woraufhin die kognitiven Methoden abgeleitet werden konnten. Hierbei wurde sich erneut an der wissenschaftlichen Studie von Richard et al. (2006) orientiert.

Die Methoden der kognitiven Prozesse können nach Entscheidungen, Bewertungen, Überprüfungen, Signalerkennungen und automatisierten Prozeduren klassifiziert werden. Viele dieser Methoden sind abhängig voneinander; das bedeutet beispielsweise, dass Methoden der Kategorie „Überprüfung“ oftmals Entscheidungen voraussetzen. Ebenso können automatisierte Prozeduren Bewertungsmethoden beinhalten oder Überprüfungen voraussetzen.

Entscheidungen Die meisten Ketten von Methoden beginnen zunächst damit, dass Entscheidungen getroffen werden müssen. Beim Autofahren werden allerdings nicht alle Entscheidungen bewusst getroffen. Vieles wird auch unbewusst entschieden und läuft gewissermaßen automatisiert ab. Ein Beispiel für eine bewusste Entscheidung wäre die Entscheidung zu bremsen, während die Entscheidung, die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs zu bewerten, eher unbewusst abläuft. Die erarbeiteten Entscheidungsmethoden bestehen lediglich aus dem Operator selbst und haben die entsprechenden automatisierten Prozeduren, Bewertungs- oder Überprüfungsverfahren zur Folge. Die erarbeiteten Methoden der verschiedenen Kategorien und ihre Einsatzregeln sind im Anhang D dieser Arbeit aufgelistet.

Bewertungen Wie gerade beschrieben, können Bewertungen nur dann stattfinden, wenn vorher die entsprechenden Entscheidungen getroffen wurden. Manche der Bewertungen können wiederum andere Methoden auslösen,

nämlich automatisierte Prozeduren. Aufgrund der Tatsache, dass auf Autobahnen zum einen die Fahrzeuge eine viel höhere Geschwindigkeit aufweisen als Fahrzeuge in der Stadt oder auf Landstraßen, und zum anderen viel häufiger die Spur gewechselt wird, müssen auch wesentlich häufiger Bewertungen vorgenommen werden. Je nachdem, in welcher Komponente der Umgebungsmatrix sich ein Objekt oder mehrere Objekte befinden, setzen andere Methoden ein. Eine Attributsveränderung hinsichtlich der Umgebungsobjekte kann ebenfalls zum Wechsel der Methode führen. Auch die Verläufe der motorischen Operatoren haben Einfluss auf den Einsatz der verschiedenen Methoden. So führt jede Lenkradveränderung, jede Gaspedalveränderung und jede Augenbewegung zum Einsatz neuer Methoden beziehungsweise Operatoren. Ebenfalls wichtig ist die Angabe darüber, ob ein Spurwechsel vorgenommen wird oder nicht. So setzt beispielsweise die Methode „Lückengröße für eventuellen Spurwechsel bewerten“ ein, sobald die Augen in Richtung der Außenspiegel gehalten werden, während die Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs beziehungsweise Verkehrs bewertet wird, sobald Objekte in den Komponenten „Nah hinten“ und „Weit hinten“ vorzufinden sind.

Überprüfungen

Neben Bewertungen können auch Überprüfungen auf vorher getroffene Entscheidungen folgen. Sie setzen also Entscheidungen voraus und führen dazu, dass neue Entscheidungen getroffen werden müssen. Die Häufigkeit von Überprüfungen wird ebenfalls durch die auf Autobahnen herrschenden hohen Geschwindigkeiten und die wiederholten Spurwechsel beeinflusst. So werden beispielsweise Geschwindigkeiten, die Spurbelegung und der tote Winkel überprüft, wobei sich die Methode „Geschwindigkeit überprüfen“ in eine relative und eine absolute Methode einteilen lässt. Bei der relativen Geschwindigkeitsüberprüfung wird die Geschwindigkeit in Bezug auf den temporären Bewegungsverlauf des Egofahrzeugs und auf seine Verkehrsumgebung bezogen. Wird die absolute Geschwindigkeit überprüft, so bedeutet dies, dass die Geschwindigkeit des Egofahrzeugs mithilfe des Tachometers kontrolliert wird.

Signalerkennungen „Signalerkennungen“, als vierte Kategorie der kognitiven Methoden, werden dadurch charakterisiert, dass sie weder Entscheidungen noch andere Methoden voraussetzen. Sie werden lediglich durch optische Reize hervorgerufen, die vom visuellen System registriert werden. Bezogen auf die erhobenen Daten, konnten lediglich die relevanten Methoden „Bremsignal erkennen“ und „Blinksignal erkennen“ erarbeitet werden. Hätte man andere Fahrdaten zur Hand, könnten selbstverständlich auch Methoden wie „Straßenunebenheiten erkennen“ oder „Straßenschild erkennen“ bei der Auswertung mit einbezogen werden.

Automatisierte Prozeduren Methoden, die den automatisierten Prozeduren zugeordnet werden, sind meist reaktiv, setzen also nicht zwangsläufig eine bewusste Entscheidung voraus. Hier ist beispielsweise von Methoden wie „Spur halten“ oder „Pedalstellung regulieren“ die Rede. Die meisten dieser Methoden setzen zwar keine Entscheidungen für die Ausführungen der Methoden voraus, ihnen müssen allerdings Bewertungen, Überprüfungen oder festgelegte Zielpositionen vorausgehen. Automatisierte Prozeduren können aber auch reflexiv sein, nämlich wenn sich bewusst für die Ausführung dieser Prozedur entschieden wurde. Hierzu gehören Methoden wie „Bremsen (um...)“ oder „Blinker betätigen“.

Die beschriebenen kognitiven Methoden und ihre Einsatzregelungen sind im Anhang D dieser Arbeit zu finden. Um zukünftig eine Auswertung der kognitiven Prozesse vornehmen zu können, bedarf es weiterer Forschungsarbeiten, die passenden Operatoren für die jeweiligen Methoden zu finden. So müssten viele Methoden mit einem Operator beginnen, der die Aufmerksamkeitsverlagerung auf ein bestimmtes Objekt oder Blickfeld beschreibt. Operatoren könnten beispielsweise auch aus der Identifikation von potentiellen Lücken, Abschätzungen von Objektpositionen oder Stärken von Brems- beziehungsweise Beschleunigungsvorgängen und zusätzlichen Entscheidungen bestehen. Methoden der Kategorie „Automatisierte Prozeduren“ müssten wiederum mit Operatoren abschließen, welche motorische Bewegungen planen und einleiten.

Um die kognitiven Prozesse der Spurwechseldaten auswerten zu können, ist es neben der Erarbeitung von Operatoren ebenfalls notwendig, die Abfolgen der Operatoren pro Methode zu bestimmen und die Einsatzregelungen zu überarbeiten.

Des Weiteren bedarf es der Ermittlung von Operatoreinsätzen und -dauern. Hierfür könnte sich unter anderem an der Studie von Libet (1979) orientiert werden, der herausfand, dass die Entscheidung der Handlungsausführung etwa 200 Millisekunden vorausgeht (Libet, Freeman & Sutherland, 1999). Die Studie von Welke, Protzak, Rötting und Jürgensohn (2011) lieferte ähnliche Ergebnisse, die sich konkret auf den Fahrkontext beziehen. Hierbei wurde herausgefunden, dass sich die Zeit zwischen der Entscheidung für ein Fahrmanöver und dessen Ausführung auf durchschnittlich 190 Millisekunden beläuft.

5 Diskussion

Für die vorliegende Arbeit wurde sich des bestehenden aufgabenanalytischen CPM-GOMS-Verfahrens bedient, welches im Rahmen der Forschungsfrage auf seine Anwendbarkeit zur Beschreibung der bei Spurwechselmanövern stattfindenden motorischen und psychischen Prozesse geprüft werden sollte. Hierfür wurden das Fahrverhalten und die damit einhergehenden Fahrzeugdaten dreier Versuchspersonen bei unterschiedlichen Spurwechselmanövern aufgezeichnet. Diese Daten wurden anschließend annotiert und ausgewertet, um die jeweiligen Eigenschaften und Zeitspannen für die Operatoren der motorischen und perzeptuellen Prozesse zu erörtern und miteinander zu vergleichen.

5.1 Kritik

Die Forschungsfrage der Arbeit wird dahingehend beantwortet, dass sich die Anwendung der CPM-GOMS-Methode dazu eignet, die bei Fahraufgaben auftretenden Prozesse zu beschreiben. Hierfür werden die Ergebnisse und verschiedene Indikatoren zur Eignungsbeurteilung der Methode diskutiert.

Das Hauptziel dieser Arbeit lag in der Eignungsbeurteilung der CPM-GOMS-Methode, welche für die Beschreibung der motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse bei Fahraufgaben angewandt wurde. Um die Methode als geeignet beurteilen zu können, war das Erreichen mehrere Teilziele notwendig. So mussten zunächst die verschiedenen Operatoren für die jeweiligen motorischen und perzeptuellen Prozesse aufgestellt werden. Dies war nach Betrachtung der Videoaufzeichnungen und der vom ViewCar aufgezeichneten Fahrzeugdaten möglich. So lieferten verschiedene Variablen der Fahrzeugdaten wichtige Informationen zur Charakterisierung der unterschiedlichen Körperbewegungen. Für die Erstellung der Operatoren des visuellen Systems waren die von der Autorin ausgearbeitete Umgebungsmatrix und die wissenschaftliche Studie von Richard et al. (2006) hilfreich. So konnten alle motorischen und perzeptuellen Operatoren für den Kontext der Fahraufgabe erstellt werden.

Zusätzlich sollten die Eigenschaften der erarbeiteten Operatoren bestimmt werden. Auch dies war mithilfe der in Kapitel 3.4 beschriebenen numerischen Auswertung

mittels *Microsoft Excel* und der darauffolgenden deskriptiven Analyse mit dem Statistikprogramm *R* möglich. Da die Dauern der verschiedenen Operatoren wichtige Eigenschaft darstellen, galt es, diese, als weiteres Ziel, zu ermitteln. Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Ergebnisse spiegeln die Operatoreigenschaften wider. So konnten vergleichsweise stabile Zeitspannen für einige Operatoren der Augen und des Kopfes ermittelt werden (vgl. Kapitel 4.2). Dies war allerdings nicht für alle Operatoren möglich. Die hohen Standardabweichungen der Operatoren für die Lenkbewegungen und die Geschwindigkeitsregulierung weisen auf sehr variable Zeitspannen hin. Um auch für diese Operatoren feste Zeitspannen ermitteln zu können, sollte eine Zerlegung der Operatoren in Betracht gezogen werden. Allerdings könnte dies zu erheblicher Mehrarbeit führen.

Weiter war die Erörterung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden der Operatoreigenschaften zwischen den verschiedenen Spurwechseltypen eines der angestrebten Ziele. Auch dieses Ziel konnte mithilfe der deskriptiven Analyse erreicht werden. So wiesen die verschiedenen Spurwechseltypen vor allem hinsichtlich der Operatoren der Augen, des rechten Fußes und der Lenkbewegungen Unterschiede auf (vgl. Kapitel 4.2). Allerdings würde die deskriptive Analyse der Operatoren des visuellen Systems konsistentere Ergebnisse liefern, wenn zusätzlich die Objekte berücksichtigt werden würden, die mittels der verschiedenen Operatoren in den Fokus des visuellen Systems rücken.

Neben den Ergebnissen müssen noch weitere Kriterien betrachtet werden, um die Anwendbarkeit der CPM-GOMS-Methode zu bewerten. So stellt der Aufwand der Analysedurchführung einen zusätzlichen Bewertungsindikator dar. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, erwies sich die Durchführung der Analyse mit etwa zehn Wochen Bearbeitung als eher aufwändig. Dies ist allerdings darauf zurückzuführen, dass die Operatoren und Methoden der verschiedenen Ressourcen zu Beginn der Auswertung charakterisiert und aufgestellt werden mussten. Dieser Arbeitsschritt müsste in zukünftigen Fahrverhaltensanalysen nur noch eingeschränkt durchgeführt werden, da bereits viele Operatoren bestehen. Besonders die Operatoren der Augen und des Kopfes sind nahezu vollständig und müssten lediglich überarbeitet und an den Kontext der Fahraufgabe angepasst werden. Weiter wurde die Umgebungsmatrix zur Rekonstruktion der Umgebungereignisse von der Autorin selbst erarbeitet, die in

Zukunft weiterverwendet werden könnte. Somit würde sich der Aufwand für die Auswertung motorischer und perzeptueller Prozesse verringern. Stünden die kognitiven Prozesse bei zukünftigen Arbeiten mehr im Fokus, so wären hierfür allerdings weitere Forschungsarbeiten notwendig, um passende Operatoren aufzustellen und deren Eigenschaften zu erörtern. Besonders in Hinblick auf die Erarbeitung von Zeitspannen müsste größerer Aufwand betrieben werden, da sich bisherige literarische Arbeiten nur beschränkt mit diesem Thema befassen haben (vgl. Welke et al., 2011).

Ein weiterer Indikator zur positiven Eignungsbeurteilung des CPM-GOMS-Verfahrens ist die Tatsache, dass mithilfe der Methode die parallelen motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse bei bestimmten Fahraufgaben dargestellt werden können. So können individuelle Verhaltensweisen aufgezeigt und miteinander verglichen werden. Die bisherigen Aufgabenanalysen, welche im Rahmen der psychologischen Verkehrsforschung durchgeführt wurden, waren dazu nicht in der Lage (vgl. Kapitel 2.2). So erörterten Richard et al. (2006) sowie Lichty und Campbell (2012) zwar motorische, perzeptuelle und kognitive Teilaufgaben bei verschiedenen Fahraufgaben; allerdings waren diese Arbeiten zu oberflächlich, um die genauen Zeitspannen und Verläufe der jeweiligen Prozesse bestimmen zu können. Somit können die Ergebnisse nicht mit den durch die CPM-GOMS-Analyse ermittelten Prozessabfolgen verglichen werden.

Weiter stellt die CPM-GOMS-Analyse eine gute Brücke zwischen reinen Aufgabenanalysen und kognitiven Modellierungen dar, wenn besonders die Analyse der kognitiven Prozesse im Interesse der Forschungsarbeit liegt.

Zusammenfassend kann die Forschungsfrage dieser Arbeit in der Weise beantwortet werden, dass die Anwendung der CPM-GOMS-Methode grundsätzlich als geeignet angesehen wird, um die parallel auftretenden Prozesse bei verschiedenen Fahraufgaben zu beschreiben. Dennoch gibt es einige Verbesserungsvorschläge für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten, die eventuell zu konsistenteren Ergebnissen führen können. Im folgenden Kapitel werden einige Verbesserungsvorschläge beschrieben.

5.2 Implikationen für Theorie und Praxis

Um die perzeptuellen Prozesse besser auswerten zu können, empfiehlt es sich, zukünftig ein Eye-Tracking-System zu verwenden, das nicht nur das Blickverhalten der Versuchspersonen aufzeichnet, sondern auch die Umgebung und den Verkehr. Damit wäre es möglich, die Blickbewegungen in die Fahrzeugumgebung zu integrieren und somit eindeutig bestimmen zu können, welche Geschehnisse der Fahrer zu welchem Zeitpunkt wahrgenommen hat. Die Umgebungsrepräsentation kann somit wesentlich einfacher gewonnen werden, wodurch eventuelle Fehler vermieden und die perzeptuellen Prozesse noch genauer bestimmt werden können. Dies hat außerdem zur Folge, dass die kognitiven Prozesse besser nachvollzogen und erörtert werden können. Ebenfalls hilfreich für ein besseres Verständnis der kognitiven Prozesse wäre der Einsatz der Think-Aloud-Methode. Hierbei kommentiert der Fahrer seine Handlungen laut und verbalisiert seine Gedanken (Sandmann, 2014). So könnte die Versuchsperson den Experimentator darüber in Kenntnis setzen, wenn die Intention besteht, ein Spurwechselmanöver auszuüben, und beispielsweise auch darüber, was zum Abbruch eines geplanten Manövers geführt hat.

Des Weiteren könnten das Fahrverhalten und die daraus entstehenden Fahrdaten anders ausfallen, wenn die Versuchsfahrten zukünftig ohne Experimentator stattfänden. Die Anwesenheit des Experimentators hat häufig zur Folge, dass das Verhalten von Versuchspersonen verfälscht wird, da diese dazu neigen, sozial erwünscht zu antworten (Stocké & Hunkler, 2004; Sedlmeier & Renkewitz, 2008). Bezogen auf die Untersuchung des Fahrverhaltens könnten Versuchspersonen also etwa nicht ihr natürliches Fahrverhalten zeigen, sondern beispielsweise ungewöhnlich oft in die Außenspiegel schauen und bei jedem Manöver den Blinker betätigen, was bei einer privaten Fahrt möglicherweise nicht der Fall wäre (Henning et al., 2008).

Darüber hinaus sollte in zukünftigen Arbeiten untersucht werden, ob und wie sich die Operatoren und deren Abfolgen verändern, wenn Spurwechselmanöver auf dreispurigen Autobahnen aufgezeichnet werden. Möglicherweise könnte die Fülle an Reizen und die damit einhergehende erhöhte Beanspruchung des Fahrers dazu führen, dass die Fahraufgabe teilweise fehlerhaft ausgeführt wird und wichtige

Teilaufgaben ausgelassen werden (Richard et al., 2006). So könnten die Fahrten auf dreispurigen Autobahnen beispielsweise durch kürzere Überwachungsprozesse, wie den Schulterblick, geprägt sein. Auch eine überfüllte zweispurige Autobahn könnte zu anderen Ergebnissen führen, da die Anforderungen an den Fahrer nicht nur durch den Straßentyp beeinflusst werden, sondern ebenfalls durch Art und Menge der anderen Verkehrsteilnehmer (Vollrath & Krems, 2011).

5.3 Fazit

Das eingangs erwähnte Ziel der Europäischen Union liegt darin, die Zahl der Verkehrstoten zwischen 2010 und 2020 um mehr als 40% zu verringern. Um dies zu erreichen, bedarf es einer Weiterentwicklung an Fahrerassistenzsystemen, die den Autofahrer bei seiner Fahraufgabe besser unterstützen und so für ein sichereres Fahrverhalten sorgen. Hierfür ist es notwendig, das Fahrverhalten und die Fahrerkognition bei bestimmten Fahraufgaben nachvollziehen zu können. Mangels eines Standardverfahrens zur Erörterung der bei Fahraufgaben auftretenden motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse, wurde sich, in Kooperation mit dem deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., im Rahmen dieser Arbeit mit der Eignungsbeurteilung der CPM-GOMS-Methode zur Beschreibung des Fahrverhaltens bei Spurwechselmanövern auf Autobahnen beschäftigt. Hierfür wurden empirische Daten von verschiedenen Versuchspersonen bei unterschiedlichen Spurwechseltypen aufgezeichnet, ausgewertet und deskriptiv analysiert. Die oben beschriebenen Ergebnisse zeigen auf, dass sich die CPM-GOMS-Methode gut eignet, um die parallelen Prozesse darzustellen. So war es möglich, für die verschiedenen Ressourcen passende Operatoren zu erarbeiten und ihre Eigenschaften zu bestimmen. Allerdings bedarf es weiterer Arbeiten, wie beispielsweise der Zerlegung der Operatoren der Lenkbewegungen und der Geschwindigkeitsregulierung, um auch für diese feste Zeitspannen zugrunde legen zu können. Außerdem müssen die Operatoren der kognitiven Prozesse aufgestellt werden und deren jeweilige Dauer bestimmt werden.

Es lässt sich feststellen, dass die Anwendung der CPM-GOMS-Analyse eine geeignete Methode ist, um die parallelen Prozesse bei Fahraufgaben zu erörtern und, zukünftig eventuell unter Anwendungen der beschriebenen Verbesserungsvorschläge, ein gutes

Verständnis des Fahrverhaltens und der Fahrerkognition zu liefern. So kann die CPM-GOMS-Analyse der Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen dienen.

6 Literaturverzeichnis

- Allen, T. M., Lunenfeld, H. & Alexander G. J. (1971). *Driver Information Needs. Highway Research Record*, 366, 102-115.
- Anderson, J. R. (2007). *Kognitive Psychologie* (6. Aufl.). Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- BMW AG. (2013). *BMW 7er Limousine : Driving Assistant Plus*. Zugriff am 01.09.2015 unter
http://www.bmw.com/com/de/newvehicles/7series/sedan/2012/showroom/driver_assistance/assistance.html#t=l
- Card, S. K., Moran, T. P. & Newell, A. (1983). *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Card, S. K., Moran, T. P. & Newell, A. (1986). The Model Human Processor: An Engineering Model of Human Performance. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. O. Thomas (Hrsg.), *Handbook of Perception and Human Performance: Vol. 2. Cognitive Processes and Performance* (S. 45-1-35). New York, NY: Wiley.
- Cohen, A. S. (1998). *Visuelle Orientierung im Straßenverkehr: Eine empirische Untersuchung zur Theorie des visuellen Abtastens*. Bern: Bfu.
- Diem, C. (2005). *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. München: Utz.
- Endsley, M. R. (1995). *Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. Human Factors*, 37(1), 32-64.
- Fastenmeier, W. & Gstalter, H. (2002). *INVENT-FAS/FVM, AP 1200: Fahraufgabenklassifikation*. Abschlußbericht im Auftrag der BMW AG, Robert Bosch GmbH, DaimlerChrysler AG, Volkswagen AG. München: mensch-verkehr-umwelt, Institut für Angewandte Psychologie.
- Fastenmeier, W. & Gstalter, H. (2003). Entwicklung und Anwendung einer neuen Methodik zur Fahreraufgabenanalyse. In VDI Wissensforum (Hrsg.), *VDI-Berichte*, 1768 (S. 197-213). Düsseldorf: VDI-Verlag.

- Fastenmeier, W., Hinderer, J., Lehnig, U. & Gstalter, H. (2001). *Analyse von Spurwechsellvorgängen im Verkehr. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 55, 15-23.
- Godthelp, H., Milgram, P. & Blaauw, G. J. (1984). The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy. *Human Factors*, 26(3), 257-268.
- Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie: Der Grundkurs* (7. Aufl.). Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Groeger, J. A. (2000). *Understanding driving: applying cognitive psychology to a complex everyday task*. Hove: Psychology Press.
- Gstalter, H. (2001). Verkehrspsychologie. In *Lexikon der Psychologie* (Bd. 4, S. 406-409). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Henning, M. J., Georgeon, O., Wynn, T. & Krems, J. F. (2008). Modelling driver behaviour in order to infer the intention to change lanes. In C. Brusque (Hrsg.), *Proceedings of European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems* (S. 113-119). Lyon: Humanist Publications.
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H. & van de Weijer, J. (2011). *Eye Tracking: A comprehensive guide to methods and measures*. Oxford: Oxford University Press.
- John, B. E. & Gray, W. D. (1995). CPM-GOMS: An Analysis Method for Tasks with Parallel Activities. In *Conference Companion on Human Factors in Computing Systems* (S. 393-394). New York, NY: ACM Press.
- John, B. E. & Kieras, D.E. (1996). Using GOMS for user interface design and evaluation: Which technique?. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 3(4), 287-319.
- Kramer, U. (1986). *Integrierte Assistenz- und Informationssysteme für den Fahrer*. Vortrag vor dem Institut für Fahrzeugtechnik TU Berlin und VDI-Arbeitskreis Fahrzeugtechnik, Berlin.
- Lee, S. E., Olsen, E. C. B. & Wierwille, W. W. (2004). *A Comprehensive Examination of Naturalistic Lane-Changes* (Report No. DOT-HS-809-702). Washington, WA: National Highway Traffic Safety Administration.

- Libet, B., Freeman, A. & Sutherland, K. (2004). *The Volitional Brain: Towards a neuroscience of free will*. Thorverton: Imprint Academic.
- Lichty, M. G. & Richard, C. M. (2012). A Task-Analytic Approach for Estimating Driver Task Demands on Specific Roadway Sections. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 2276-2280.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do? In L. Evans & R. C. Schwing (Hrsg.), *Human Behavior and Traffic Safety* (S. 485-524). New York, NY: Springer US.
- McKnight, A. J. & Adams, B. B. (1970). *Driver Education Task Analysis. Volume I: Task Descriptions. Final Report* (Report No. DOT-HS-800-367). Alexandria, VA: Human Resources Research Organisation.
- McKnight, A. J. & Adams, B. B. (1970). *Driver Education Task Analysis. Volume II: Task Analysis Methods. Final Report* (Report No. DOT-HS-800-368). Alexandria, VA: Human Resources Research Organisation.
- Noyer, U., Schmidt, E. A., Utesch, F., Waigand, D. & Köster, F. (2013). Betrachtungen zur systematischen Durchführung von Naturalistic Driving Studies. In *Der Fahrer im 21. Jahrhundert – Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit* (S. 287-298). Braunschweig: VDI Wissensforum.
- Olson, J. R. & Olson, G. M. (1990). The Growth of Cognitive Modeling in Human-Computer Interaction Since GOMS. *Human-Computer Interaction*, 5(2), 221-265.
- Richard, C. M., Campbell, J. L. & Brown J. L. (2006). Using a task analysis to identify potential information processing bottlenecks in intersection driving scenarios. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(22), 2433-2437.
- Rockwell, T. H. (1972). Skills, judgement and information acquisition in driving. In T. W. Forbes (Hrsg.), *Human factors in highway traffic safety research* (S. 133-164). New York, NY: Wiley.
- Sanders, M. S. & McCormick, E. J. (1993). *Human factors in engineering and design* (7. Aufl.). New York, NY: McGraw-Hill.

- Sandmann, A. (2014). Lautes Denken – die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 179-188). Berlin: Springer.
- Sedlmeier, P. & Renkewitz, F. (2008). *Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie*. München: Pearson Studium.
- Statistisches Bundesamt. (2013). *Verkehr auf einen Blick*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Statistisches Bundesamt. (2015). *Verkehr: Verkehrsunfälle* (2014). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Stocké, V. & Hunkler, C. (2004). Die angemessene Erfassung der Stärke und Richtung von Anreizen durch soziale Erwünschtheit. *ZA-Information*, 54, 53–88.
- Vollrath, M. & Krems, J. (2011). *Verkehrspsychologie: Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Walker, G. H., Stanton, N. A. & Young, M. S. (2001). Hierarchical task analysis of driving: A new research tool. In M. A. Hanson (Hrsg.), *Contemporary Ergonomics* (S. 435-440). London: Taylor & Francis.
- Ward, P., Hancock, P. A., Ganey, H. C. N. & Szalma, J. L. (2003). Naturalistic Driving: User and Task Analysis. *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 70-72.
- Welke, S., Protzak, J., Rötting, M. & Jürgensohn, T. (2011). What Is Human? How the Analysis of Brain Dynamics Can Help to Improve and Validate Driver Models. In V. G. Duffy (Hrsg.), *Digital Human Modeling* (S. 513-522). Berlin: Springer.
- Winner, H., Hakuli, S. & Wolf, G. (Hrsg.). (2009). *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Winsum, W. van, Waard, D. de, Brookhuis, K. A. (1999). Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(3), 139-149.

- Wolf, H., Zöllner, R., & Bubb, H. (2006). Ergonomischer Lösungsansatz für die gleichzeitige Rückmeldung mehrerer Fahrerassistenzsysteme an den Fahrer. In *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München: TÜV-Süd.

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Time to Line Crossing-Kriterium (TLC) (Winner et al., 2009).....	74
Anhang B: Fotos der im Fahrzeug eingebauten Kameras.....	75
Anhang C: Vollständige Liste der verwendeten Variablen der ViewCar-Daten.....	77
Anhang D: Tabelle der kategorisierten kognitiven Methoden und ihren Einsatzregelungen	78
Anhang E: Abbildungen der zeitlichen Operatorverläufe für die verschiedenen Versuchspersonen und Spurwechseltypen.....	80

Anhang

Anhang A: Time to Line Crossing-Kriterium (TLC) (Winner et al., 2009)

Unter dem Time to Line Crossing-Kriterium (TLC) wird die Zeit verstanden, die es dauert, bis der Autofahrer mit einem Teil seines Fahrzeugs das erste Mal die Fahrbahnmarkierung überfährt. Die Berechnung des TLC findet bei Spurhalteassistenten Anwendung, da diese den Fahrer vor einem unbeabsichtigten Verlassen des Fahrstreifens warnen.

Das TLC-Kriterium wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$TLC = \frac{b/2 - b_{fzg}/2 \pm x_{off}}{v \cdot \sin(\psi)}$$

Formel 3. *Time-to-Line-Crossing*.

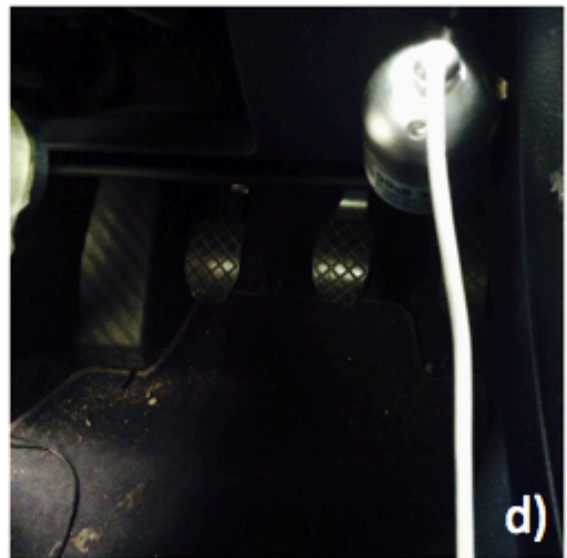
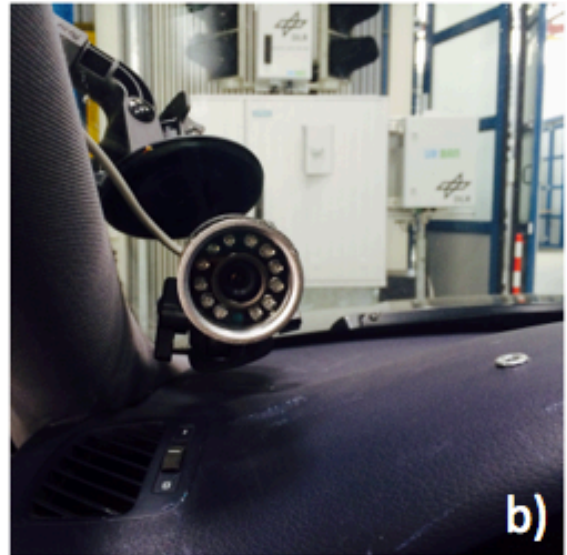
b = Fahrstreifenbreite

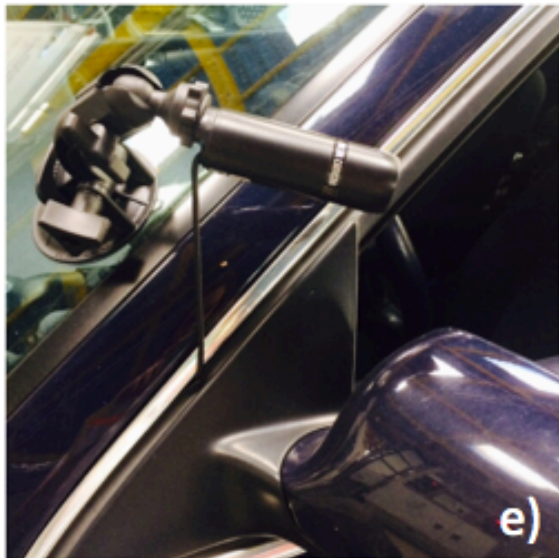
v = Geschwindigkeit

x_{off} = Abstand zur Fahrstreifenmitte

b_{fzg} = Fahrzeugbreite

ψ = Orientierung des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens

Anhang B: Fotos der im Fahrzeug eingebauten Kameras



Die Fotos zeigen die im Fahrzeug eingebauten Kameras mit a) Sicht auf den Fahrer und dessen Hände am Lenkrad von der Kopfstütze des Beifahrers aus, b) Sicht auf den Fahrer vom Armaturenbrett vorne links aus, c) Sicht in den Rückspiegel von der Decke aus und somit aus derselben Höhe wie die Augen des Fahrers, d) Sicht in den Fußraum des Fahrers, e) Sicht wie die des linken Außenspiegels, f) Sicht nach hinten von rechts oben außerhalb des Fahrzeugs aus, g) Sicht nach vorne aus dem Fahrzeug und h) Sicht nach hinten aus dem Fahrzeug.

Anhang C: Vollständige Liste der verwendeten Variablen der ViewCar-Daten

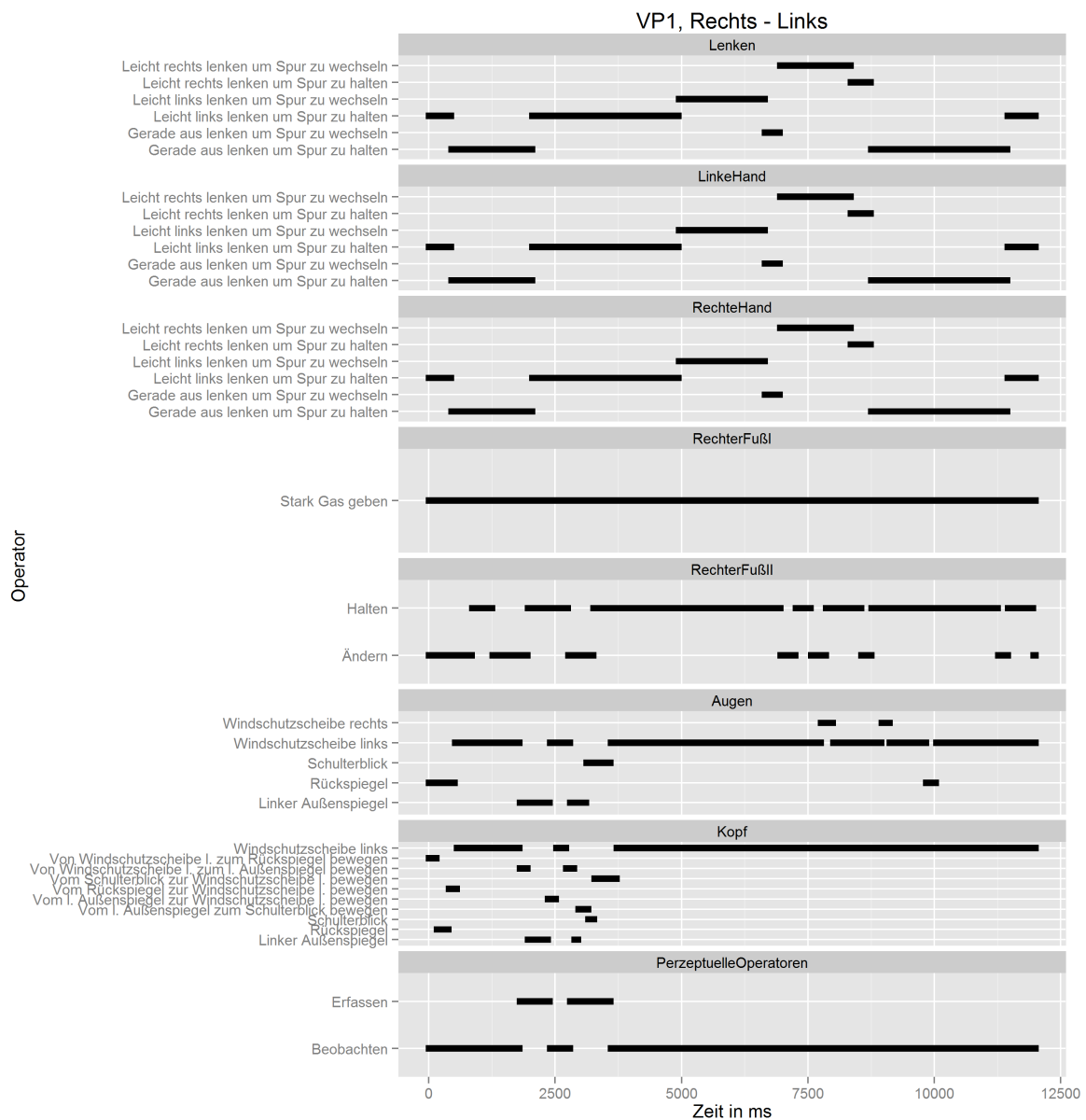
Name	min/max	Wertelabel	Einheit	Beschreibung
VELOCITYCAR	0.0; 327.67		Kilometer /Stunde	Fahrzeuggeschwindigkeit
FAHRER_BREMST	0.0; 1.0	0 = Bremspedal nicht betätigt; 1 = Bremspedal betätigt	-	Gibt an, ob Bremspedal betätigt wird
LENKRADWINKEL_SIGN	0.0; 1.0	0 = Radstellung nach links, Lenkwinkel vom Nullpunkt entgegen dem Uhrzeigersinn; 1 = Radstellung nach rechts, Lenkwinkel vom Nullpunkt in Richtung Uhrzeigersinn	-	Gibt Vorzeichen des Lenkradwinkels an
LENKRADWINKEL	0.0; 1433.6		Grad	Winkel der Lenkradstellung
BLINKER_RECHTS	0.0; 1.0	0 = Blinker leuchtet nicht; 1 = Blinker leuchtet	-	Gibt an, ob rechter Blinker leuchtet
BLINKER_LINKS	0.0; 1.0	0 = Blinker leuchtet nicht; 1 = Blinker leuchtet	-	Gibt an, ob linker Blinker leuchtet
GASPEDALWERT	0.0; 100	Prozentangabe bezieht sich auf die Öffnung der Drosselkappe	Prozent	Gaspedalwert
TO_DX	0; 256		Meter	Abstand zum Zielobjekt
LDW_BVS_QUERABWEI_I116	-8.0; 8.0	+ = Querabweichung nach links; - = Querabweichung nach rechts	Meter	Abweichung des Fahrzeugs von Fahrspurmitte

Anhang D: Tabelle der kategorisierten kognitiven Methoden und ihren Einsatzregelungen

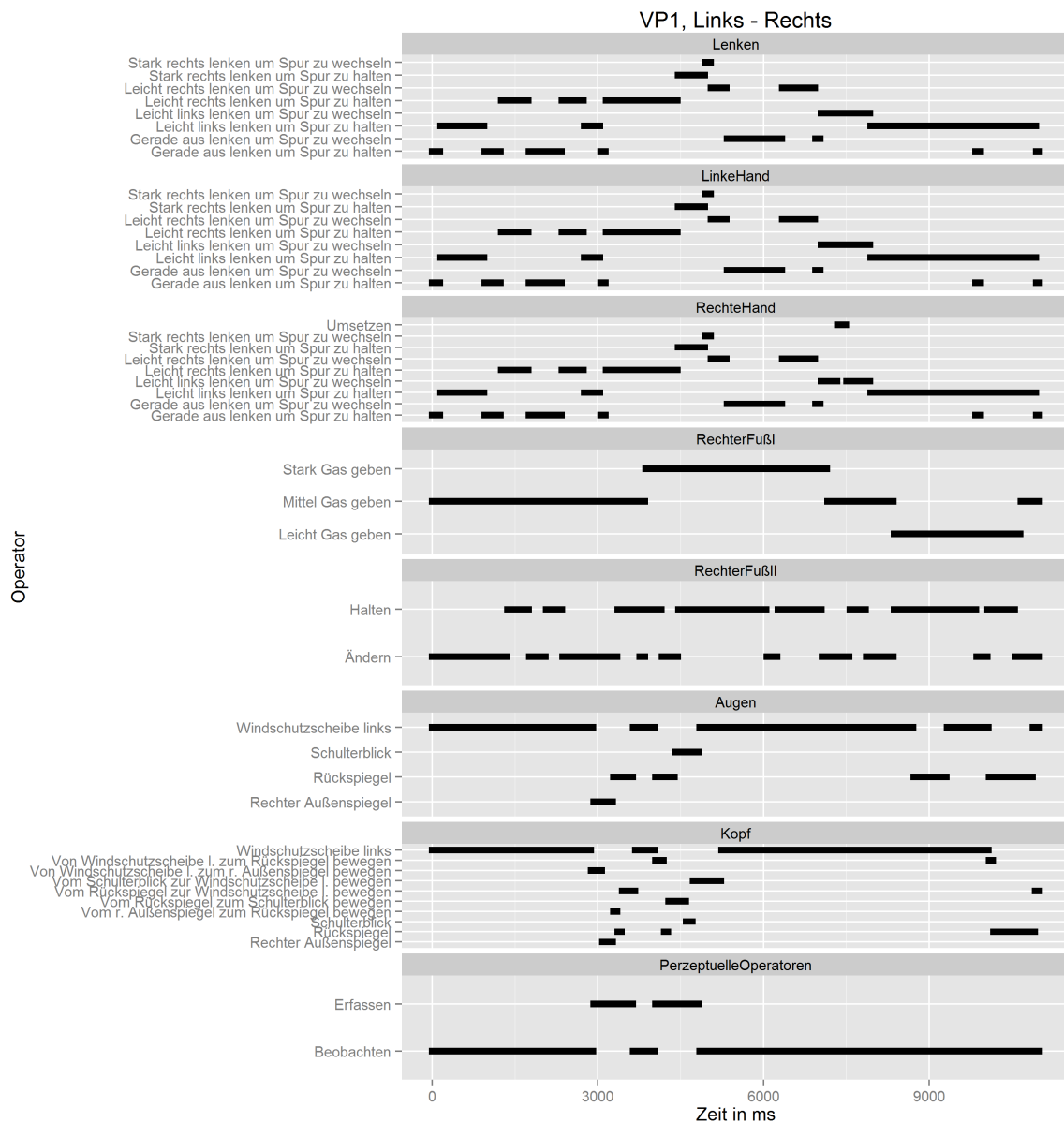
Kategorie	Methode	Einsatzregelungen
Entscheidungen		
	Entscheiden zu bremsen	Vor Methode "Bremsen"
	Entscheiden zu beschleunigen	Vor Methode "Beschleunigen"
	Entscheiden zu verlangsamen	Vor Methode "Verlangsamen"
	Entscheiden Schulterblick auszuführen	Vor Methode "Schulterblick"
	Entscheiden Blinker zu betätigen (links oder rechts bereits bestimmt)	Vor Methode "Blinker betätigen"
	Entscheiden Hand abzulegen/umzusetzen	Vor Methode "Hand ablegen"; "Hand umsetzen"
	Entscheiden Lücke zu bewerten	Vor Methode "Lückengröße bewerten", "Spurbelegung überprüfen"
	Entscheiden Abstand zu bewerten	Vor Methode "Abstand bewerten"
	Entscheiden Geschwindigkeit zu bewerten	Vor Methode "Geschwindigkeit bewerten"
	Entscheiden Beschleunigung zu bewerten	Vor Methode "Beschleunigung bewerten"
	Entscheiden Fahrzeugposition zu überprüfen	Vor Methode "Zielposition ermitteln" bzw. "Bewegungsbahn bewerten"
	Entscheiden Geschwindigkeit zu überprüfen	Vor Methode "Geschwindigkeit überprüfen"
	Entscheiden Spurbelegung zu überprüfen	Vor Methode "Spurbelegung überprüfen"
	Entscheiden toten Winkel zu überprüfen	Vor Methode "Toten Winkel überprüfen"
Bewertungen		
	Lückengröße für eventuellen Spurwechsel bewerten	Bei den Operatoren der Augen, immer wenn „Augen in Richtung linker Außenspiegel halten“ und „Augen in Richtung rechter Außenspiegel halten“
	Abstand/Position zum vorderen Fahrzeug/Verkehr bewerten	Immer wenn Objekte zum ersten Mal in den Komponenten „Nah vorne“ und „Weit vorne“ bei allen Spuren; Wenn Objekt bereits bekannt, dann nur bei Egofahrzeugspur
	Abstand/Position zum hinteren Fahrzeug/Verkehr bewerten	Immer wenn Objekte in den Komponenten „Nah hinten“ und „Weit hinten“ bei allen Spuren
	Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	Immer wenn Objekte zum ersten Mal in den Komponenten „Nah vorne“ und „Weit vorne“ bei allen Spuren; Wenn Objekt bereits bekannt, dann nur bei Egofahrzeugspur
	Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	Immer wenn Objekte in den Komponenten „Nah hinten“ und „Weit hinten“ bei allen Spuren
	Beschleunigung des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	Immer wenn Objekte zum ersten Mal in den Komponenten „Nah vorne“ und „Weit vorne“ bei allen Spuren; Wenn Objekt bereits bekannt, dann nur bei Egofahrzeugspur
	Beschleunigung des hinteren Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	Immer wenn Objekte in den Komponenten „Nah hinten“ und „Weit hinten“ bei allen Spuren
	Bewegungsbahn des Egofahrzeugs bewerten	Immer bevor die Methoden „Spur halten“ und „Längs- und Querverführung regulieren“ einsetzen

Überprüfungen		
	Relative Geschwindigkeit überprüfen	Immer bevor die Methoden „Bremsen (um...)“, „Beschleunigen“ oder „Verlangsamen“ einsetzen
	Absolute Geschwindigkeit überprüfen	Bei den Operatoren der Augen, immer wenn „Augen in Richtung Tacho halten“
	Spurbelegung überprüfen	Bei den Operatoren der Augen, immer wenn „Augen in Richtung linker Außenspiegel halten“ und „Augen in Richtung rechter Außenspiegel halten“
	Toten Winkel überprüfen	Bei den Operatoren der Augen, immer wenn „Augen in Richtung Schulterblick halten“
Signalerkennungen		
	Bremssignal erkennen	Immer wenn Objekte vor dem Egofahrzeug das Attribut „bremsen“ aufweisen
	Blinksignal erkennen	Immer wenn Objekte vor dem Egofahrzeug das Attribut „blinken“ aufweisen
Automatisierte Prozeduren		
Reaktiv	Spur halten	Bei den Operatoren der Hände, immer wenn sich die Lenkradbewegungen verändert, während „Kein Wechsel“ in der Spalte „Fahrbahnwechsel“ vermerkt ist
	Abstand halten	Immer wenn Objekte in den Komponenten „Nah vorne“ und „Weit vorne“ bei der Egofahrzeugsfur
	Pedalstellung regulieren	Bei den Operatoren des rechten Fußes, immer wenn „Gas verändern“
	Längsführung beim Spurwechsel regulieren	Bei den Operatoren der Hände, immer wenn sich die Lenkradbewegungen verändert, während „Wechsel“ in der Spalte „Fahrbahnwechsel“ vermerkt ist
	Querführung beim Spurwechsel regulieren	Bei den Operatoren der Hände, immer wenn sich die Lenkradbewegungen verändert, während „Wechsel“ in der Spalte „Fahrbahnwechsel“ vermerkt ist
	Zielposition ermitteln	Immer bevor die Methoden „Spur halten“, „Längsführung beim Spurwechsel regulieren“ oder „Querführung beim Spurwechsel regulieren“ einsetzen
Reflexiv	Bremsen (um...)	Bei den Operatoren des rechten Fußes, immer vor „Vom Gaspedal zum Bremspedal bewegen“
	Beschleunigen	Bei den Operatoren des rechten Fußes, immer wenn sich das Gas erhöht (bei „Leicht Gas geben“, wenn vorher kein Gas gegeben wurde; bei Wechsel von „Leicht Gas geben“ auf „Mittel Gas geben“; bei Wechsel von „Mittel Gas geben“ auf „Stark Gas geben“)
	Verlangsamen	Bei den Operatoren des rechten Fußes, immer wenn sich das Gas verringert (Regeln konform zur vorherigen Methode)
	Blinker betätigen	Bei den Operatoren der linken Hand, immer vor „Hand zum Blinker bewegen“
	Schulterblick	Bei den Operatoren der Augen, immer wenn „Augen in Richtung Schulterblick halten“
	Hand ablegen/umsetzen	Bei den Operatoren der beiden Hände, immer vor „Hand ablegen“ und „Hand umsetzen“

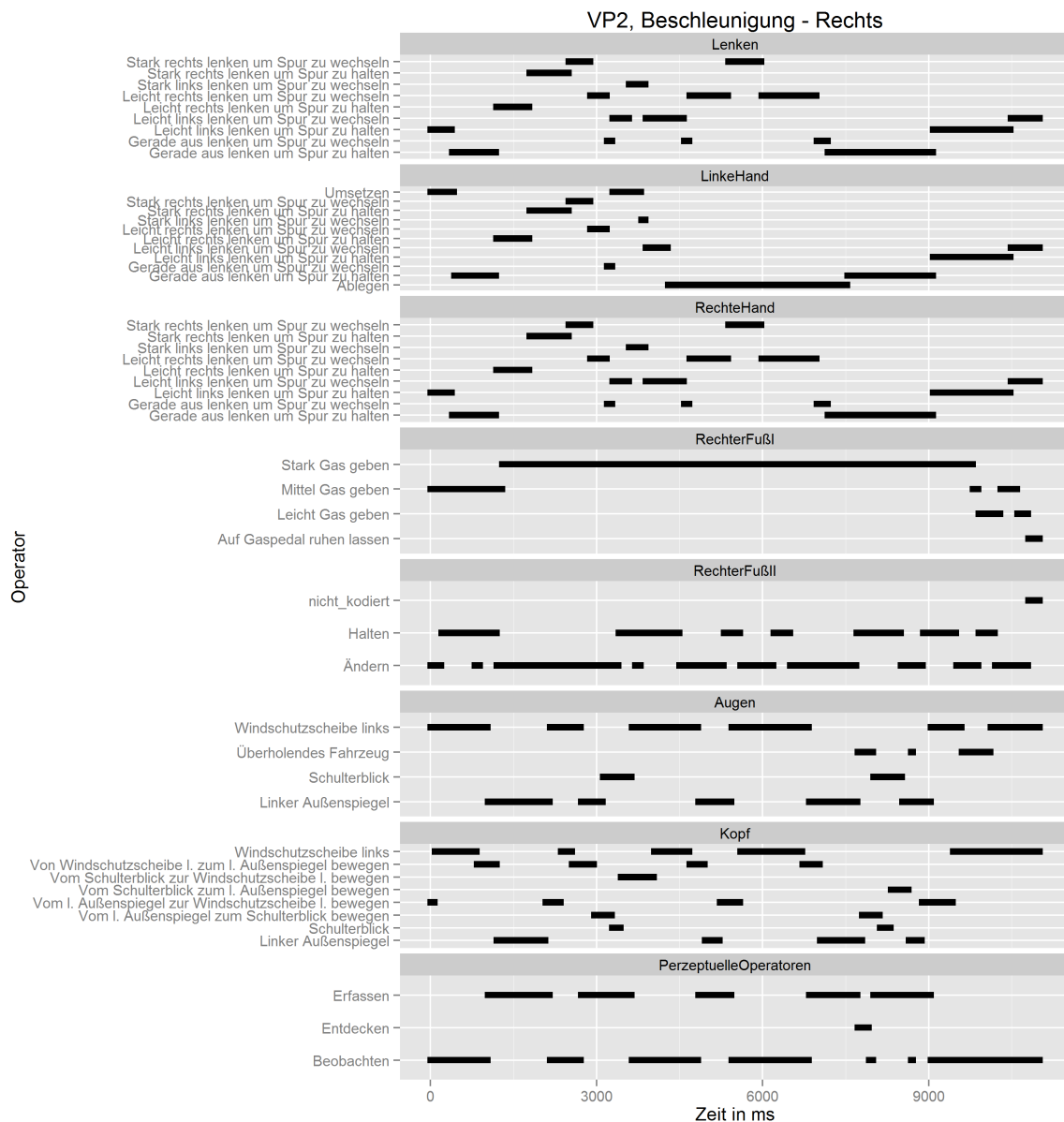
Anhang E: Abbildungen der zeitlichen Operatorverläufe für die verschiedenen Versuchspersonen und Spurwechseltypen



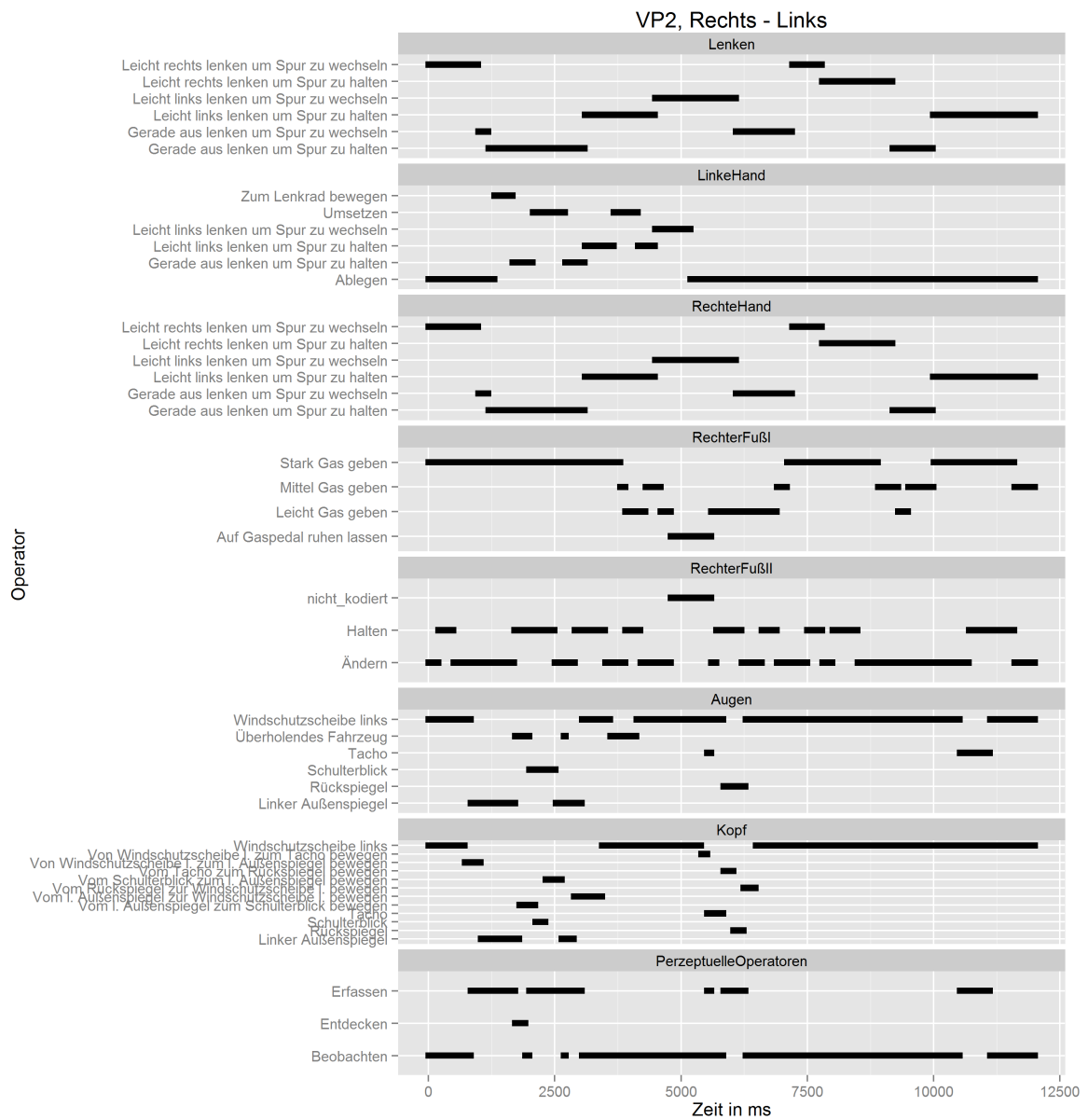
Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 1 für den Spurwechselmanöver vom rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen.



Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 1 für den Spurwechselmanöver vom linken Fahrstreifen auf den rechten Fahrstreifen.



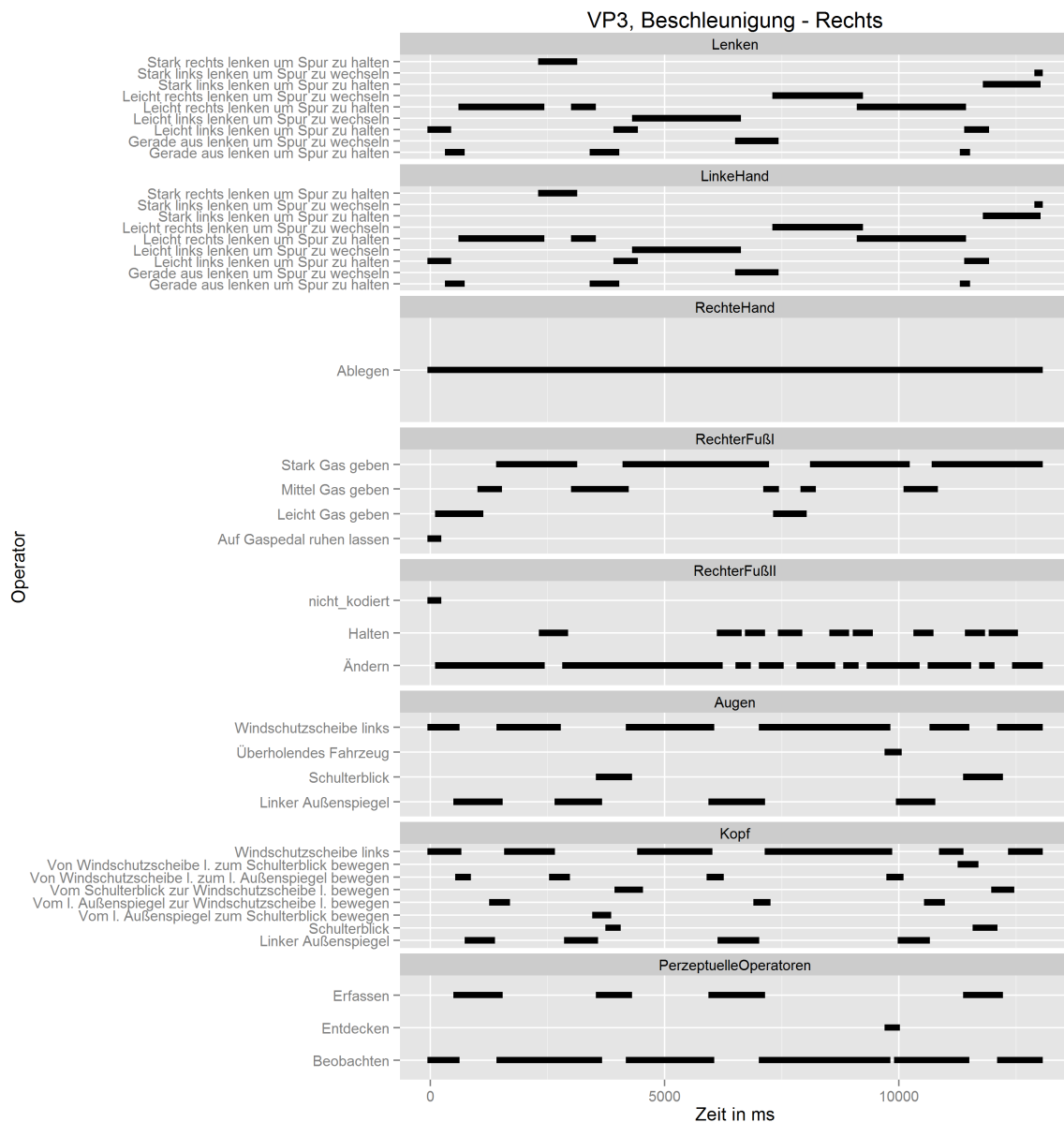
Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 2 für den Spurwechselmanöver vom Beschleunigungstreifen auf den rechten Fahrstreifen.



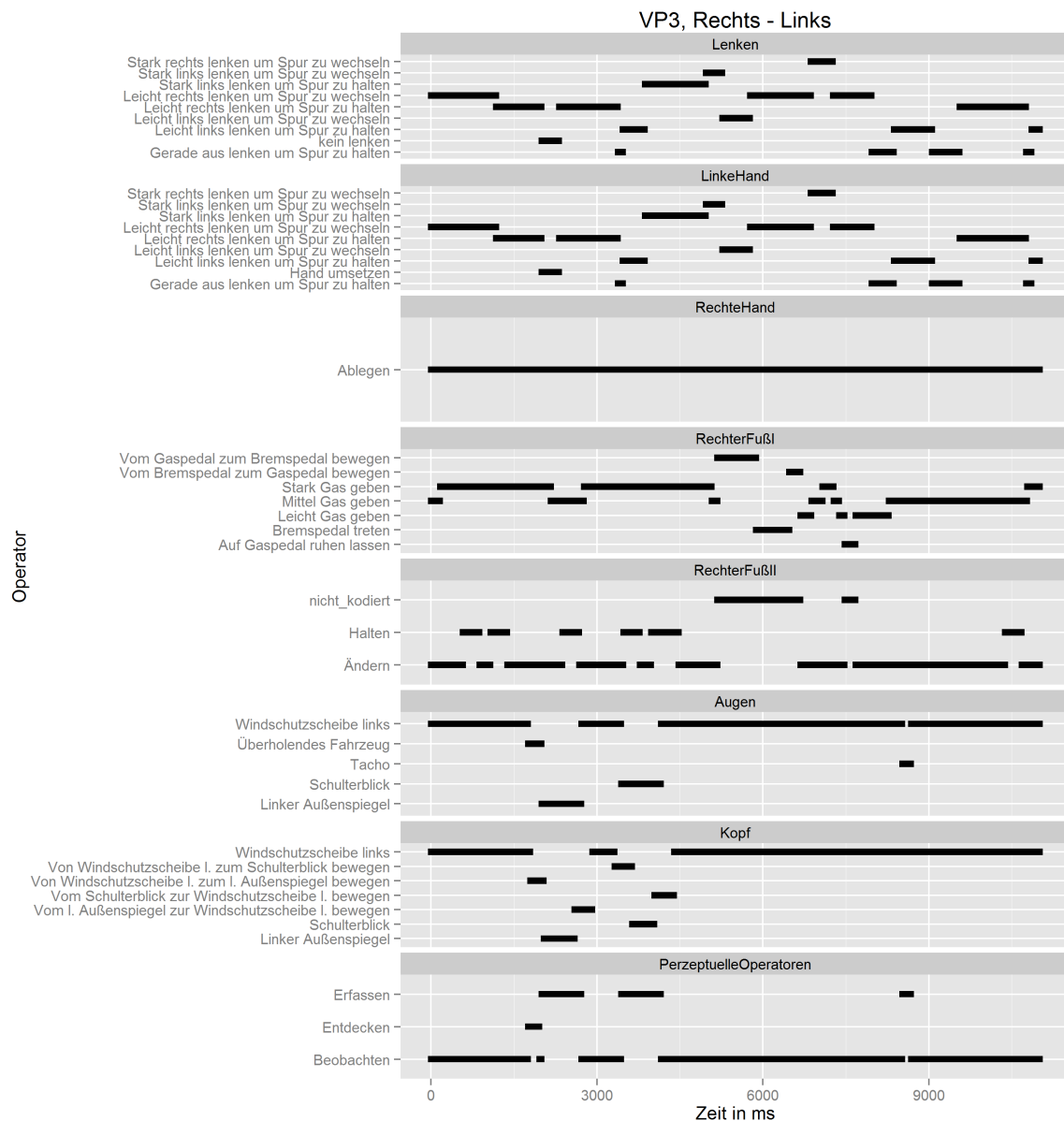
Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 2 für den Spurwechselmanöver vom rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen.



Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 2 für den Spurwechselmanöver vom linken Fahrstreifen auf den rechten Fahrstreifen.



Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 3 für den Spurwechselmanöver vom Beschleunigungstreifen auf den rechten Fahrstreifen.



Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 3 für den Spurwechselmanöver vom rechten Fahrstreifen auf den linken Fahrstreifen.



Die Abbildung zeigt den zeitlichen Operatorverlauf der Versuchsperson 3 für den Spurwechselmanöver vom linken Fahrstreifen auf den rechten Fahrstreifen.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wortwörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

(Datum, Unterschrift)